

El ordenador de procesos en la industria del cemento

F. STERBA

Siemens Industria Eléctrica, S.A.

Para la fabricación del cemento se necesitan como materias primas fundamentales la caliza y la arcilla, o también mezclas naturales de ambas (margas), teniéndose que mantener en el producto final una combinación determinada de estos componentes para poder ajustarse a las prescripciones de calidad del producto.

Estas materias primas se encuentran en la naturaleza combinadas en forma muy diversa desde el punto de vista mineralógico y químico, lo cual crea dificultades en su elaboración posterior. Por lo tanto, en la automatización del proceso es función principal del ordenador el considerar la heterogeneidad de las materias primas y calcular en consecuencia la mezcla de componentes.

Las materias primas, molidas como grano muy fino (80 hasta 100 μ) en forma de harina cruda, se calcinan en un horno a la temperatura aproximada de 1.450°C para dar el clínker. El porcentaje de la mezcla determina en forma fundamental la calidad del clínker. Por ello, al proceso de calcinación se antepone una preparación del crudo cuya meta es mantener dicho porcentaje dentro de unos márgenes predeterminados. La elaboración posterior del clínker consiste en la adición de elementos como yeso y escoria de horno alto y la molienda hasta una finura de aprox. 30 μ . Diversas características, como consistencia y fraguado, pueden alterarse por el grado de finura en la molienda y la composición química de los aditivos empleados.

El proceso de fabricación del cemento se puede dividir en varias partes; a saber: extracción de las materias primas, preparación de la harina cruda y calcinación.

EXTRACCION DE LAS MATERIAS PRIMAS

Las materias primas (caliza, arcilla o las diferentes margas) se extraen casi siempre en canteras abiertas, luego se trituran hasta tamaño de grava y en muchos casos se almacenan como tal grava en silos intermedios.

En esta fase de la producción es necesario ya fijar un primer concepto muy importante: en qué orden se extraerán las materias que se encuentran en distintas capas de la cantera y que tienen además diferente composición química. El tamaño y la formación del almacén de material triturado tiene gran influencia en los problemas de regulación y mando del proceso de molienda de crudo que le sigue, especialmente cuando se trata de nuevas fábricas. Si las materias primas que provienen de una cantera son constantes en su composición química, se puede formar la harina cruda con ayuda de una simple regulación gravimétrica (mezcla cuantitativa). Cuando no se dispone de estas canteras ex-

cepcionales, que no se encuentran con frecuencia, hay que decidir si se extraen las materias primas en forma selectiva y se mezclan en un montón para su homogeneización o si se quiere conseguir esto mismo mezclando los materiales durante su extracción.

La tendencia a unidades de explotación más grandes (aparatos y sistemas de transporte) ha llevado a que en las canteras se extrae el material sólo en unos pocos puntos, generalmente son dos o tres materiales muy distintos en su contenido de caliza. Por ello ha encontrado gran aceptación el sistema de explotación selectiva seguido de un stock-pile.

La extracción en la cantera se realiza teniendo en cuenta la estructura geológica, las posibilidades técnicas de la extracción y la composición química de las materias primas. Aquí hay que distinguir entre planes de explotación a largo, medio y corto plazo. Si se sigue el proceso de fabricación, entonces ya se encuentran en la extracción de las materias primas varias funciones a resolver por el ordenador.

PREPARACION DE LA HARINA CRUDA

La preparación de la harina cruda comprende la mezcla de las diferentes materias primas, el secado, el molido y la homogeneización. En este proceso la composición química, es decir, la relación de los componentes C (CaO), F (Fe_2O_3), A (Al_2O_3) y S (SiO_2) y el grado de finura de la harina cruda (harina para el horno), sólo debe variar entre márgenes muy estrechos.

Como las materias primas no se encuentran generalmente en la naturaleza mezcladas en las proporciones deseadas, la función principal de la preparación de la harina cruda consiste en mezclar óptimamente las materias primas caliza, margas y arcilla. Es muy importante que la parte básica (CaO) esté compensada con la parte ácida (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) para que se formen los minerales del clínker sin quedar libre parte de CaO.

Para poder valorar esta relación de la mezcla, la industria del cemento hace uso generalmente del grado de saturación y los módulos siguientes:

$$\text{Grado de saturación } GS = \frac{100 C}{0,7F + 1,1A + 2,8S} \quad [1]$$

$$\text{Módulo de silicatos } MS = \frac{S}{A + F} \quad [2]$$

$$\text{Módulo de fundentes } MF = \frac{A}{F} \quad [3]$$

Estos parámetros tienen, según la calidad del cemento, unos valores determinados, calculados según las fórmulas [1], [2] y [3], con las diferentes cantidades de componentes de la harina cruda C, F, A y S. A veces también se emplea el método de los análisis potenciales, que calcula la composición mineralógica del clínker formado por C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF .

Para poder juzgar sobre el funcionamiento y características del equipo de preparación de crudo, en especial el número y tamaño de los depósitos y silos de material triturado, se aplican los llamados "planos de variación" desarrollados por la casa Siemens (fig. 1).

Cada materia prima K_i ($i = 1 \dots n$) empleada para formar la harina cruda contiene cier-

tas cantidades de los componentes C, F, A y S. Los valores de los análisis del componente i se emplean como valores unitarios:

$$\left. \begin{aligned} c_i &= \frac{C_i}{K_i} ; \\ f_i &= \frac{F_i}{K_i} ; \\ a_i &= \frac{A_i}{K_i} ; \\ s_i &= \frac{S_i}{K_i} . \end{aligned} \right\} \quad [4]$$

En estas fórmulas C_i , F_i , A_i y S_i indican la cantidad (en toneladas) del componente en cuestión y K_i es la cantidad (en toneladas) de la materia prima observada.

El porcentaje α_i de la materia prima K_i en la cantidad de harina cruda considerada, la cual se compone de los pesos parciales C, F, A y S es:

$$\alpha_i = \frac{K_i}{C + F + A + S} ; \quad [5]$$

con n materias primas empleadas para formar el crudo será entonces:

$$\sum_1^n \alpha_i = \frac{K_1 + K_2 + \dots + K_i \dots + K_n}{C + F + A + S} = 1 . \quad [6]$$

Los pesos parciales referidos a los componentes C, F, A y S en el crudo, es decir, los valores del análisis del crudo son:

$$\left. \begin{aligned} c_i &= \sum_1^n \alpha_i \cdot c_i = \frac{\sum_1^n C_i}{C + F + A + S} ; \\ f &= \sum_1^n \alpha_i \cdot f_i = \frac{\sum_1^n F_i}{C + F + A + S} ; \\ a &= \sum_1^n \alpha_i \cdot a_i = \frac{\sum_1^n A_i}{C + F + A + S} ; \\ s &= \sum_1^n \alpha_i \cdot s_i = \frac{\sum_1^n S_i}{C + F + A + S} ; \end{aligned} \right\} \quad [7]$$

de donde resulta que:

$$c + f + a + s = 1 \quad ; \quad [8]$$

y en magnitudes unitarias para el crudo obtenido:

$$\text{Grado de saturación } GS = \frac{100 \, c}{0,7f + 1,1a + 2,8s} \quad . \quad [9]$$

$$\text{Módulo de silicatos } MS = \frac{s}{a + f} \quad . \quad [10]$$

$$\text{Módulo de fundentes } MF = \frac{a}{f} \quad . \quad [11]$$

Las fábricas de cemento trabajan generalmente con cuatro materias primas.

Con los análisis de las materias primas que se suponen previamente conocidos y la proporción de uno de los componentes, se varían las proporciones de los demás, de tal forma que el grado de saturación y los módulos deseados se encuentren dentro de los márgenes estipulados para la mezcla del crudo.

Los resultados de los cálculos se representan en el gráfico llamado “planos de variación”.

El ejemplo expuesto corresponde a un grado de saturación $GS = 100$ con cuatro materiales de análisis conocidos y con la proporción del material K_1 variable entre 0 y 12 %. Las familias de curvas de los 4 cuadrantes tienen el parámetro α_1 con los valores 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 % y representan:

Cuadrante I Módulo de silicatos MS en función de la proporción del material K_2 .

Cuadrante II α_3 , en función de α_2 .

Cuadrante III α_3 , en función de α_4 .

Cuadrante IV Módulo de silicatos MS , en función del módulo de fundentes MF .

El rectángulo rayado en el IV cuadrante reproduce los márgenes de tolerancia del módulo de silicatos MS entre 2,4 y 2,7 y los márgenes de tolerancia para el módulo de fundentes MF entre 1,8 hasta 2,5. De acuerdo con ello, solamente se podrá considerar una participación K_1 entre aproximadamente 1 y 7 %. Al trasladar los márgenes de tolerancia del cuadrante IV a los cuadrantes I, II, III, resultan las proporciones correspondientes a K_2 , K_3 y K_4 .

Si al sistema de cálculo descrito se le agregan los costos de fabricación y de los equipos (canteras, almacén de material triturado, preparación de crudo y producción de clínker), se pueden conseguir, supuestos unos márgenes admisibles de la composición química del crudo o del clínker, los datos de fabricación correspondientes a unos costos de producción mínimos.

Stock-pile

A lo largo del proceso de fabricación hay almacenamientos de materiales (almacén de material triturado, silos, etc.), motivados por el sistema discontinuo de explotación de la cantera y de los equipos de machaqueo, cuyo tamaño depende de la producción horaria

de la instalación posterior de trituración (como son las machacadoras y molinos de crudo) y las necesidades de clinker. En la industria del cemento americana y en parte también en la europea, se incluyen estos silos o almacenes intermedios en la filosofía del mando de la preparación del crudo.

Si estos elementos deben cumplir no sólo tal función de almacenamiento sino también la de mezcla, cosa que se presenta por otro lado como muy conveniente, resultan dos concepciones diferentes para el control de los mismos:

- a) Control sin influir en una forma determinada la composición química de los materiales: el ordenador da las órdenes a los órganos de carga y descarga de los elementos de almacenamiento para que actúen según un programa determinado. Con este sistema solamente se consigue compensar las fluctuaciones del material a corto plazo.
- b) Control modificando en una forma determinada la composición química de los materiales: el ordenador tiene, además de la función de mando de la carga y descarga del elemento, la valoración de los análisis de las materias primas (con extracción cíclica de las muestras), el balance de la cantidad y composición química de los materiales entrados, así como también la explotación de la cantera.

Molinos de crudo

La grava se transforma en harina en los molinos de crudo (harina para el horno), los cuales deben realizar dos funciones:

- a) Triturar, sacar y moler los materiales (grava) a una finura tal como para poderlos calcinar y transformar en clinker.
- b) Mezclar los materiales conforme al grado de saturación y módulos de la harina cruda.

En lo que sigue nos hemos limitado al procedimiento por vía seca, empleado hoy con predominio.

La trituración se realiza generalmente por medio de molinos de bolas con separadores en circuito cerrado.

Según la calidad deseada del cemento, se determinan los valores de consigna para el grado de saturación y los módulos. Como valores orientativos para cementos portland citaremos los siguientes:

$$GS = 92 \text{ hasta } 98.$$

$$MS = 2,4 \text{ hasta } 2,7.$$

$$MF = 1,5 \text{ hasta } 2,5.$$

Una de las funciones más importantes del ordenador, es el mantener dentro de unos márgenes muy estrechos la composición química del crudo por medio de la regulación de la mezcla, así como la finura de la harina y la regulación del llenado del molino para conseguir su rendimiento óptimo.

Silos de homogeneización

Las instalaciones de homogeneización sirven, como ya indica la palabra, para conseguir una uniformidad adicional del crudo. Utilizando un espectrómetro de rayos X y el ordenador se consigue en un intervalo de tiempo de 8 horas una variación del grado de saturación del crudo de $\Delta GS \leq \pm 1$. Al ser este margen de variación muy pequeño, se puede

prescindir de los grandes y muy costosos silos de homogeneización. En este caso son suficientes los silos de almacenamiento de crudo, como necesario acoplamiento entre el molino y el horno, con los cuales se lleva a cabo una homogeneización continua.

LA UTILIZACION DEL ESPECTROMETRO DE RAYOS X JUNTO CON UN ORDENADOR DE PROCESOS

La exigencia más importante por cumplir en la fabricación del cemento es mantener constante la calidad del producto y producirlo en una cantidad suficiente. Condición previa para ello es poder controlar aquella por medio de análisis rápidos durante la preparación del crudo.

El análisis espectral con rayos X para determinación cualitativa y cuantitativa de elementos, aplicado desde hace unas décadas en muchos campos de la técnica, ha sido la base para el desarrollo del espectrómetro multicanal de rayos X (MRS) que ha sido empleado con éxito en los últimos años. Este espectrómetro hace posible la medición con exactitud suficiente y en un tiempo muy corto (aprox. 1 a 5 min) de los elementos Ca, Fe, Al y Si en representación de los óxidos CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 y SiO_2 . Con ello se ha podido conseguir por primera vez una mejora esencial en la calidad del crudo, empleando métodos de regulación por tanteos en la preparación del mismo.

A continuación nos referiremos en particular a la solución de algunos problemas relacionados con esta regulación por tanteos en la toma de muestras, en el análisis por fluorescencia con rayos X y en la aplicación del ordenador de procesos.

Toma de muestras

El material extraído para su análisis como muestra debe ser representativo, dentro de lo posible, del total producido en un cierto intervalo de tiempo. En la práctica, el valor obtenido a partir de las muestras diferirá del valor real del material, y las causas del error radican en la extracción de la muestra (incluyendo la preparación de la misma) y en la precisión del análisis.

Técnica de la toma de muestras

Para que, dentro de lo posible, la muestra sea representativa de todo el material, el dispositivo de extracción de muestras deberá cumplir las siguientes condiciones:

- a) El material deberá extraerse en forma uniforme de la cantidad total del material por investigar.
- b) Cuando varíe la cantidad de material transportada, deberá variarse en la misma proporción la cantidad de la muestra.
- c) No deberá presentarse efecto de disgregación.

Se puede distinguir fundamentalmente entre toma de muestras periódicas (tambor ranurado, cubeta pendular, separador de abanico) y continuas (separador tubular, tornillo sin fin, tubo vibrador).

Llamando T a la duración del período de toma de muestra y t al tiempo que dura la extracción misma, entonces se toma del total del material transportado una cantidad en la proporción $\frac{t}{T}$ y después para su elaboración posterior la cantidad $1 - \frac{t}{T}$. Naturalmente el total del material debe extraerse durante el tiempo t , para que las fórmulas anteriores sean válidas.

Precisión de la toma de muestras

La precisión del sistema de extracción de la muestra depende, en primer lugar, de la relación $\frac{t}{T}$ y, en segundo lugar, de la duración del período T . Si éste es bastante corto, se podrá considerar la extracción de las muestras como aproximadamente continua.

Como medida de la precisión del método de extracción empleado se aplica por lo general la desviación standard de los valores de los análisis, independientemente de si la prueba ha sido extraída de un material que fluye en forma continua o de la cantidad total de material almacenado:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a_m)^2}{n - 1}}$$

a_m indica la media de los valores de los análisis obtenidos en las muestras parciales a_i .

Con el ordenador de procesos, además de las funciones de mando, se controlan las desviaciones y, con ello, se consigue aumentar notablemente la precisión en la toma de muestras.

Análisis por fluorescencia de rayos X

En el espectrómetro multicanal de rayos X (MRS) se descompone la radiación fluorescente obtenida de la irradiación de la muestra, determinando por medio de tubos contadores la intensidad y frecuencia de onda de las radiaciones correspondientes a los elementos Ca, Fe, Al y Si. Por medio de curvas calibradas correspondientes a muestras de composición conocida, se puede calcular la concentración de cada elemento a partir de los impulsos medidos.

El espectrómetro multicanal trabaja en forma discontinua y puede efectuar mediciones con materiales llegados desde varios puntos de toma de muestras diseminados por toda la fábrica (fig. 2). Mediante la fabricación de pastillas y el corto tiempo de medida (aprox. 1 min), se consigue una elevada exactitud en los resultados.

El espectrómetro se ha proyectado como un aparato para llevar a cabo análisis con toma y transporte automático de las muestras, y su acoplamiento normalizado al ordenador de procesos le hace formar con él una unidad funcional que permite dominar ampliamente el control de la calidad del material. Además del mando y vigilancia de las funciones (como, por ejemplo, la repetición automática de una medida cuando la intensidad varía en forma inadmisiblemente), el ordenador valora los resultados obtenidos para determinar el grado de saturación y los módulos.

REGULACIONES CON EL ORDENADOR DE PROCESOS

Cuando el grado de saturación y los módulos se apartan del valor de consigna deseado, el ordenador ajusta las básculas para conseguir una nueva relación en la mezcla de las materias primas. Su intervención es inmediata, con lo cual se cierra el circuito de regulación (fig. 2).

Además de la mezcla, el ordenador también lleva a cabo la regulación del llenado de los molinos de crudo y de cemento.

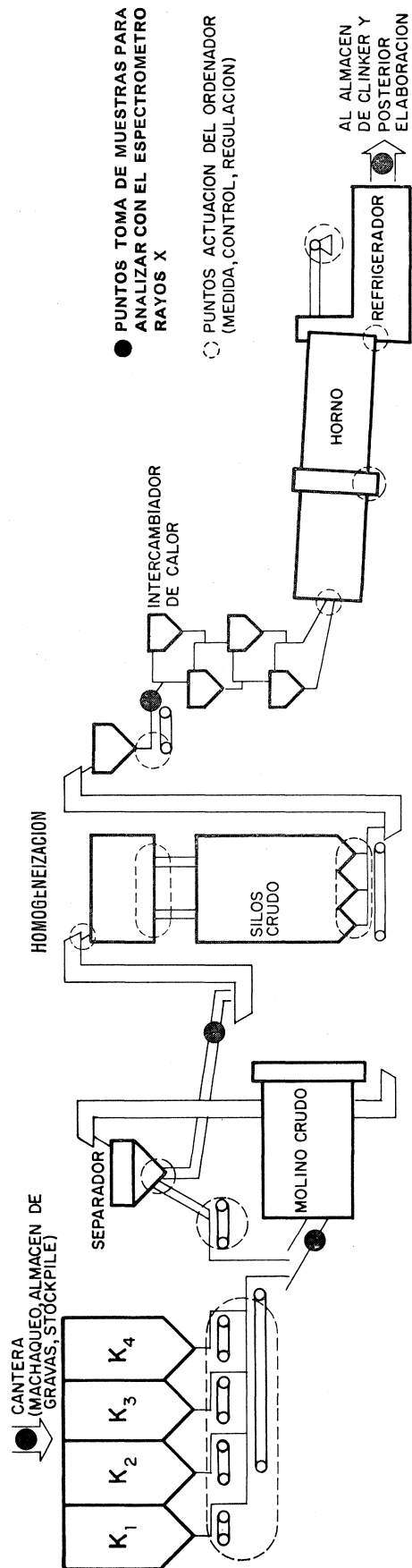


Fig. 2

Regulación de la mezcla

La regulación de la mezcla tiene por objeto asegurar la uniformidad de la composición química del crudo, ya que con los medios convencionales sólo sería posible un control de la mezcla. Para esta regulación se parte de la base de que sea aplicable un análisis físico rápido para determinar el valor real de la composición química del crudo (grado de saturación y módulos), el cual se puede conseguir por medio del MRS a la entrada o a la salida del molino (fig.2). La tabla I muestra para ambos casos las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos. Si ya existe un equipo de homogeneización, entonces se dará preferencia a la extracción de la muestra a la salida del molino.

Para determinar el valor de consigna de las básculas alimentadoras de materiales primarios, el ordenador realiza una serie de operaciones:

En primer lugar se determina analíticamente con el ordenador la composición de la materia prima más desconocida, que en la mayoría de las fábricas suele ser las margas. A partir de los valores obtenidos por el análisis del crudo con el MRS, según la ecuación [7], y la posición de las básculas, según la ecuación [5], se calcula, por medio de la ecuación [6], el total de cada componente.

Al ser conocida la composición de los demás materiales primarios se pueden calcular, con la ecuación [4] y los valores de las básculas, el peso del material desconocido y su análisis.

Con ello quedan determinados los análisis de todos los materiales primarios; y cuando aparezcan desviaciones en los valores de consigna del grado de saturación o de los módulos, el ordenador ajustará nuevamente las básculas alimentadoras.

Debido al tiempo de permanencia del material dentro del molino, no se pueden evitar pequeñas oscilaciones en los resultados de la regulación. El silo de almacenamiento que debe haber entre el molino y el horno hace posible la corrección de estas variaciones de los valores de consigna del *GS*, *MS* y *MF* al cabo de uno o n ciclos, por ejemplo por medio de la ecuación:

$$GSZ_i = GS_{consigna} + GSZ_{i-1} - \frac{\sum_1^n GS_{real}}{n}, \quad [12]$$

en la cual:

GSZ_i = Grado de saturación meta para los próximos n ajuste de las básculas.

$GS_{cons.}$ = Grado de saturación de consigna.

GSZ_{i-1} = Grado de saturación meta en los n ajustes anteriores de las básculas.

GS_{real} = Grado de saturación real.

Las experiencias de este sistema de regulación de la mezcla han dado muy buenos resultados en dos instalaciones ya suministradas, habiéndose ampliado además las funciones de regulación para otros pedidos en curso de realización. En la figura 3, se muestra un modelo de protocolo de una fábrica alemana funcionando con este sistema de regulación.

Regulación del llenado

Son conocidos ya los métodos de regulación por medio de la potencia del elevador de cangilones, mediciones electroacústicas o de ambos. Estos sistemas sólo cumplen en parte

30,5	14,47			
PTO.1	C	F	A	S
AN.CR.	66,57	2,92	6,89	20,74
	GS	MS	MF	GSMETA
	98,27	2,35	2,11	101,08
	MARGAS	CALIZA	ARCILLA	
CALC. BASC.	91,38		5,00	3,62

— ajuste calculado de las básculas.

Inf. perturbación.

30,5	15,17			
PTO.1	C	F	A	S
AN.CR.	67,05	2,84	6,65	20,16
	GS	MS	MF	GSMETA
	101,91	2,34	2,12	
	MARGAS	CALIZA	ARCILLA	
CALC. BASC.	90,17		5.00	4.83

Nuevos valores de análisis, módulos y ajustes de básculas, una vez hecho el ajuste ordenado a las 14,47, ver protocolo superior.

30,5	15,18			
PTO.3	C	F	A	S
AN.CR.	66,96	2,87	6,64	20,65
	GS	MS	MF	GSMETA
	99,68	2,31	2,17	

Mtra. tomada a la entrada del horno (entre los puntos 1 y 3 hay un plazo de varias horas por el movimiento del material).

Al presentar en la actualidad dificultades parcialmente insalvables la medición continua de determinadas magnitudes que influyen en la molienda, como son dureza, humedad y estado del molino, se actúa a través de decisiones lógicas entre las diferentes magnitudes. El ordenador dispone de una tabla de decisiones sobre el estado de llenado del molino, con la cual obtiene los correspondientes cambios en los mandos y consigue aproximarse al estado de servicio óptimo (tabla II).

T A B L A I

Ventajas e inconvenientes de la toma de datos reales a la salida o entrada del molino

	Ventajas	Inconvenientes
Salida del molino.	Toma muestra más sencilla; el material ya está molido; son suficientes pequeñas cantidades para conseguir buena representatividad.	Hay un ciclo de exploración y ajuste con un límite mínimo debido a las constantes de tiempo en el transporte y trabajo del sistema de molienda; aumentan las oscilaciones en la calidad y la homogeneización.
Entrada del molino.	Se reducen las constantes de tiempo y las oscilaciones en la calidad y exigencias de la homogeneización.	La toma de muestras es más cara; hace falta un molino de muestras y hay que tomar grandes cantidades para conseguir buena representatividad.

T A B L A I I

Decisiones lógicas para la regulación del molino

Caso n.º	VALORES DE MEDIDA		Retorno molino	CONCLUSIONES		Notas	Decisión que se debe adoptar en la alimentación
	Potencia elevador	Prod. crudo		Llenado molino	Molienda del material		
1	cte.	aumenta	disminuye	disminuye	fácil		aumentar
2	cte.	dism.	aumenta	aumenta	difícil		disminuir
3	aumenta	aumenta	dism.	dism.	fácil		aumentar
4	aumenta	aumenta	cte.	dism.	fácil		aumentar
5	aumenta	aumenta	aumenta	dism.	fácil	Después de taponamiento	
6	aumenta	cte.	aumenta	cte.	difícil		disminuir
7	aumenta	dism.	aumenta	aumenta	difícil	Peligro taponamiento	disminuir
8	disminuye	dism.	aumenta	aumenta	difícil	Peligro taponamiento	disminuir
9	disminuye	dism.	cte.	aumenta	difícil		disminuir
10	disminuye	dism.	dism.	aumenta	difícil		disminuir
11	disminuye	cte.	dism.	cte.	fácil		aumentar
12	disminuye	aumenta	dism.	dism.	fácil		aumentar