

# **UNA PERSPECTIVA GENERAL DEL APAGADO DE LA CAL Y LOS FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO**

---

***Este trabajo fue escrito por el señor Mohammad Hassibi Ingeniero Senior de CHEMCO SYSTEMS L. P., para ser presentado en el “3er Symposium Internacional Sorbalit” en Noviembre de 1999.- Revisado en Febrero de 2009***

Desde que el Apagado de la Cal es parte integral del tratamiento de los sistemas de aguas, aguas industriales, polución del aire y procesos industriales su comportamiento influye en la efectividad del proceso además de los costos de operación. Este “trabajo” presenta una discusión y revisión de los factores que afectan la eficiencia y resultado de los sistemas de apagado de cal

## **INTRODUCCIÓN**

La investigación sobre el apagado de la cal se ha dado con bases limitadas en los años recientes. La mayoría de estas investigaciones se han dado bajo el auspicio de la “ National Lime Association”. La información presentada en este trabajo ha sido preparada con la información de investigaciones realizadas por otros y el autor, por los años de manejo y experiencia en el Apagado de Cal del autor.

Ya que la piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) es un mineral que se encuentra en forma natural, su composición química y características físicas varían no solo desde un área a otra área, pero sin variación en las vetas de una misma área. Esta variación en la calidad de la piedra caliza natural, resulta en variaciones en la calidad del producto final, que es el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

El uso de la cal en sus variadas formas ha ido constantemente en aumento con ningún término a la vista. Hoy en día la cal viva es el producto químico más importante usado en el mundo para el control de la polución. Es por la tanto, imperativo conocer el manejo y procesamiento de la cal viva, para que sea bien entendido por todos los que usan este producto químico.

## **PROCESO DE FABRICACION DE LA CAL VIVA Y PROCESO DE APAGADO DE LA CAL**

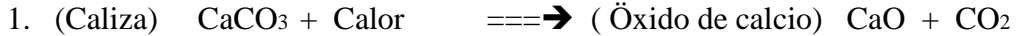
La piedra caliza o carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), existe como piedra natural a través del mundo. En su forma natural tiene una reacción muy baja, por esto su uso es muy limitado. Su uso más significativo es en forma de polvo en la agricultura, y en la desulfuración de gases de combustión como lechada de cal. El uso de la cal en la forma de carbonato es un estado que escapa al objetivo de este trabajo. Nos concentraremos entonces en la cal en sus formas de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

En la mayoría de los aplicaciones de control de contaminación la cal es utilizada como hidróxido de calcio. Para la fabricación del hidróxido de calcio la piedra caliza o carbonato de calcio, se debe convertir primeramente en óxido de calcio  $\text{CaO}$  y luego se convierte en

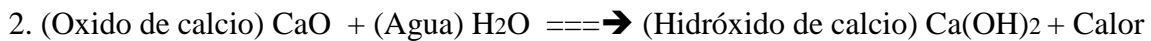
Hidróxido de Calcio esto se realiza por un proceso que se llama calcinación, posteriormente en otro proceso se obtiene hidróxido de calcio.

### Calcinación

El proceso químico se muestra en las ecuaciones químicas siguientes:



Sin embargo el óxido de calcio (CaO) es inestable en presencia de la humedad y del anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>). La forma mas estable de la caliza es como Hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>



Los pesos atómicos de los elementos son los siguientes

Ca	→	40
O	→	16
H	→	1

Por consiguiente para la fórmula N° 2 el balance es el siguiente

CaO	+	H <sub>2</sub> O	=	Ca(OH) <sub>2</sub>
40 + 16	+	1+1+16	=	74
56	+	18	=	74

Calor Generado en la reacción = 489 BTU

De esto deducimos que 56 unidades de CaO + 18 unidades de H<sub>2</sub>O resultan en 74 unidades de Ca(OH)<sub>2</sub>.

La relación De Hidróxido de calcio a Oxido de calcio es de  $74 \div 56 = 1.32$ .

Esto significa que 1 Kg de CaO + 0,32 Kg de agua, producen 1,32 kilos de lechada de cal.

Esta es la cantidad mínima de agua requerida para la reacción química, así el hidróxido de calcio contiene 75.7% de CaO y 24,3% de agua.

El proceso de adición de agua al óxido de calcio para producir hidróxido de calcio se conoce como proceso de hidratación de la cal y/o Apagado de cal.

La hidratación del Oxido de calcio, conocido en el mercado como “cal viva”, es un proceso de tipo exotérmico, y que genera una gran cantidad de calor.

El proceso de hidratación cuando se hace con la cantidad de agua justa se llama “Hidratación Seca”. En este caso de hidratación el producto es un polvo seco. Cuando se usa un exceso de agua en la hidratación el proceso se llama “Apagado”, en este caso el producto resultante de la hidratación tiene la forma de una lechada. Nuestro objetivo es referirnos al proceso de “Apagado”. El proceso de Apagado normalmente se hace con una gran cantidad de agua en exceso variando desde 2½ a 6 partes de agua por 1 parte de CaO.

## **EQUIPOS USADOS PARA EL PROCESO DE APAGADO**

No es la intención de este “Paper” evaluar los equipos de Apagado descritos mas abajo. La intención de este trabajo es mostrar los diferentes tipos de equipos disponibles para el proceso de apagado. Hay básicamente cuatro tipos de Apagadores de cal disponibles en el mercado y estos son:

- A) Apagador con retención de lechada ó Slakers
- B) Apagador de Pasta.
- C) Apagador de Molino de bolas
- D) Apagador Batch

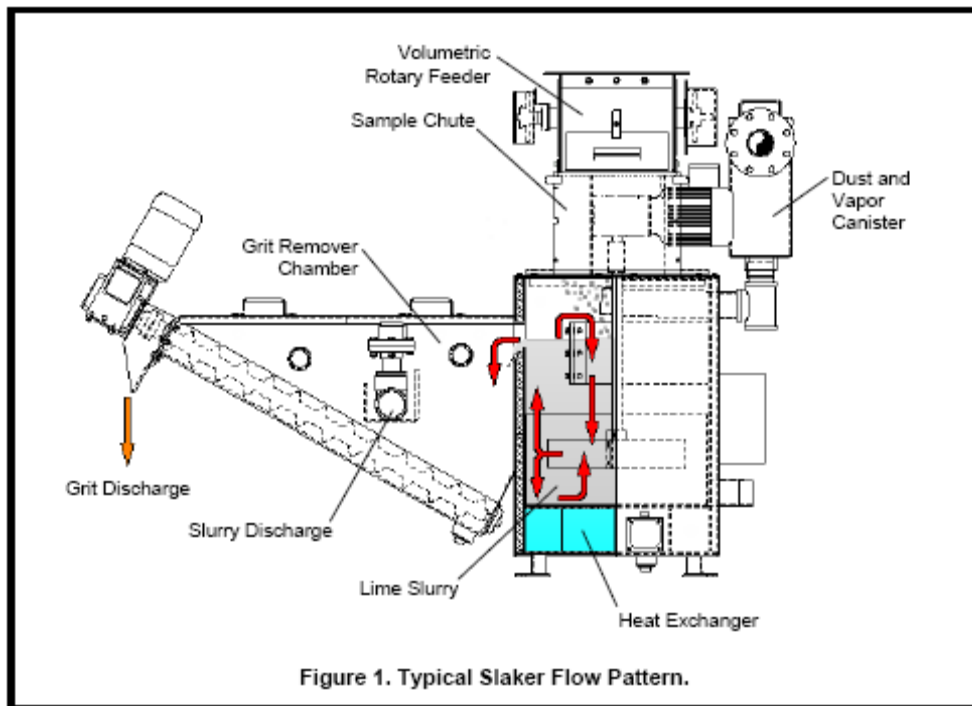
Un Apagador (slaker) debe mezclar la cantidad correcta de cal viva y agua, hidratar la cal viva, y separar las impurezas y arenillas resultantes en la lechada de hidróxido de calcio resultante.

## A) APAGADOR DE CAL TIPO SLAKER

El apagador de cal tipo Slaker, generalmente en su partida usa una relación de agua de 3.3 o 5 partes a 1 de Cal Viva (CaO), dependiendo de la fabricación del equipo y de la calidad del agua y del CaO. Un Apagador de Cal típico, llamado también Apagadores tipo retención, están compuestos por dos cámaras. La primera cámara llamada “cámara de apagado”, es donde la cal viva y el agua se mezclan. La segunda cámara es usada usualmente para remover la arenilla. La lechada de cal fluye entre estas cámaras por gravedad. La viscosidad ó densidad ó concentración (depende como se mida) es reducida en la segunda cámara con la adición de agua fría lo que permite que la arenilla, se decante en el fondo de la segunda cámara, donde la arenilla es elevada y descargada por medio de un transportador de tornillo.

La **figura N° 1**, muestra un apagador de este tipo. El apagador de cal, está diseñado generalmente para una retención de 10 minutos a su máxima capacidad. Esto significa que una partícula de CaO se demora 10 minutos, desde que ingresa al Slaker hasta que entra a la segunda cámara, donde se remueve la arenilla.-

*Figura N° 1*



El Apagador de Cal está disponible para una variedad de tamaños y capacidades, desde 150 lb/hr (81 kg/hr) hasta 15 Tons/hr ( 33050 lb/hr). Los apagadores están disponibles también con separadores vibratorios de arenillas externos. Los apagadores de cal con retención son los equipos de uso más común en Europa y los Estados Unidos de Norte América

### Cuadro de Apagadores estándar fabricados por Chemco

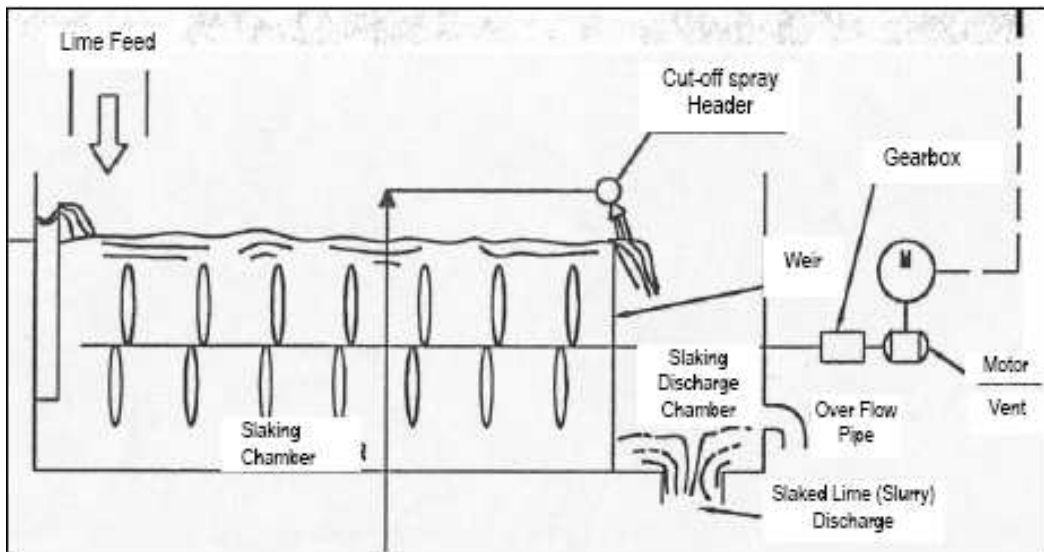
<b>MODELO</b>	<b>CAPACIDAD MAXIMA LB/HR</b>	<b>CAPACIDAD MAXIMA TON/HR</b>	<b>AGUA DE APAGADO GPM</b>	<b>AGUA MÁXIMA REQUERIDA PARA LECHADA DE 15 %</b>	<b>MOTOR DEL SLAKER EN HP 1era/2da CAMARA</b>
<b>40.01</b>	<b>250</b>	<b>0.1134</b>	<b>1.9</b>	<b>3.3</b>	<b>1.5</b>
<b>40.02</b>	<b>500</b>	<b>0.2268</b>	<b>3.9</b>	<b>6.7</b>	<b>1.5</b>
<b>40.02B</b>	<b>1000</b>	<b>0.4536</b>	<b>7.9</b>	<b>13.3</b>	<b>1.5</b>
<b>40.03</b>	<b>1500</b>	<b>0.6804</b>	<b>11.9</b>	<b>20.0</b>	<b>1.5</b>
<b>40.03B</b>	<b>2000</b>	<b>0.9072</b>	<b>15.9</b>	<b>26.6</b>	<b>5.0</b>
<b>40.04</b>	<b>3000</b>	<b>1.3608</b>	<b>23.9</b>	<b>39.9</b>	<b>5.0</b>
<b>40.04B</b>	<b>4000</b>	<b>1.8144</b>	<b>31.9</b>	<b>53.3</b>	<b>5.0</b>
<b>40.05</b>	<b>5000</b>	<b>2.2680</b>	<b>39.9</b>	<b>66.6</b>	<b>5.0</b>
<b>40.06</b>	<b>6000</b>	<b>2.7216</b>	<b>47.9</b>	<b>79.9</b>	<b>7.5</b>
<b>40.08</b>	<b>8000</b>	<b>3.6287</b>	<b>63.9</b>	<b>106.6</b>	<b>10.0</b>
<b>40.12</b>	<b>12000</b>	<b>5.4431</b>	<b>95.9</b>	<b>159.8</b>	<b>10.0/0.5</b>
<b>40.16</b>	<b>16000</b>	<b>7.2525</b>	<b>127.9</b>	<b>213.1</b>	<b>15.0/0.5</b>
<b>40.24</b>	<b>24000</b>	<b>10.8862</b>	<b>191.8</b>	<b>319.7</b>	<b>15.0/10.0</b>

## B) APAGADORES DE PASTA

Los Apagadores de pasta, tal como lo indica su nombre, apagan la cal en una forma de pasta. La relación de cal a agua es generalmente de  $1 \div 2,5$ . Los apagadores de pasta son compactos en tamaños y están diseñados para un tiempo de retención de 5 minutos en la cámara de apagado. En los apagadores de pasta, la pasta de hidróxido de calcio es muy pesada para fluir por gravedad, se usan paletas rotatorias para empujar la pasta hasta el punto de descarga. Una vez que la pasta sale del apagador es diluida aproximadamente a 1 parte de cal por 5 partes de agua. Esta dilución permite separar la arenilla por gravedad o por un harnero vibrador externo. La consistencia de la pasta del Apagador de Pasta y la lechada del Apagador de cal con retención, es exactamente la misma después de la dilución para remover la arenilla.

Los Apagadores de Pasta están disponibles en capacidades desde 1000 lb/hr (545 kg/hr) hasta 8000 lb/hr (3632 kg/hr). Los Apagadores de Pasta son más usados en los Estados Unidos de Norte América. **La figura N° 2**, nos muestra una descripción gráfica del Apagador de Pasta. El elevador de arenillas no se muestra en esta figura.

*Figura N° 2*



### C) APAGADOR DE MOLINO DE BOLAS

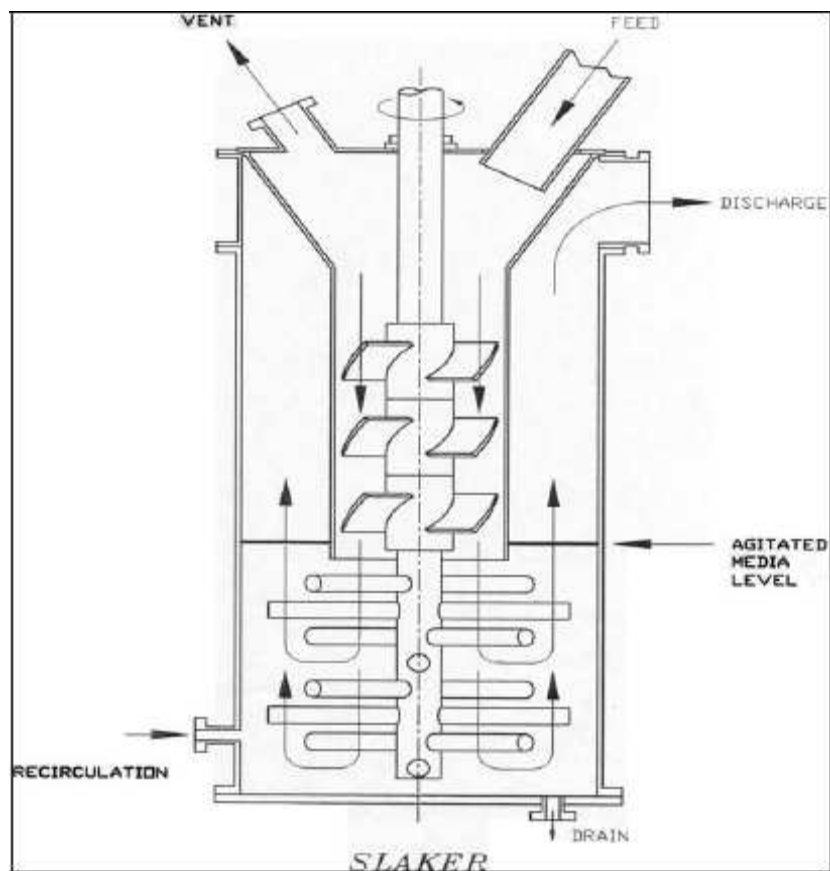
El Apagador de Molino de Bolas es una adaptación del molino de bolas tradicional, el que originalmente fue diseñado para el trabajo de molienda seca o húmeda de minerales, que al trabajo de apagado de cal. Dos tipos de molino de bolas son usados para apagar cal, uno del tipo vertical y otro del tipo horizontal. Los Apagadores de Molino de Bolas generalmente son ocupados cuando:

- La capacidad requerida es mayor que la de los otros tipos mencionados
- Debido a condiciones cero de descarga en el sitio y descarga de arenilla no permitida.
- Cuando el agua disponible es muy alta en sulfatos o sulfitos para un apagado regular.

El Apagador de Molino de Bolas es mucho más caro que el Apagador de Pasta y el Apagador de Retención. Estos Apagadores están disponibles en capacidades desde 10000 lb/hr (4540 kg/hr) hasta 50 Ton/hr (22700 kg/hr). **La Figura N° 3** muestra un Apagador de Molino de Bolas Attritor, tipo Vertical.

El Apagador de Molino de Bolas está equipado con un clasificador externo, el cual separa la lechada de las arenillas sobre medida y las impurezas. Las arenillas sobre medida son enviadas de vuelta al molino para su reducción.

*Figura N° 3*



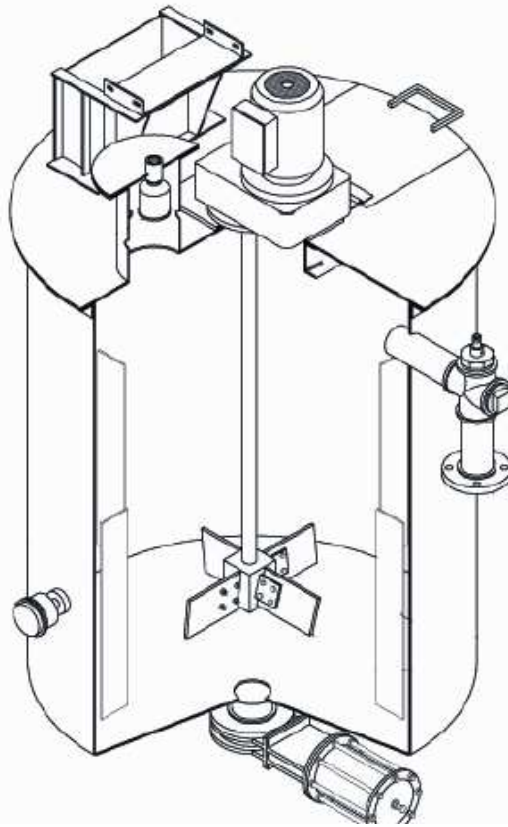
## D) APAGADOR BATCH

El Apagador tipo Batch es una variación del Apagador de Lechada. Típicamente su trabajo es el siguiente:

Cómo su nombre lo indica, el operador decide el tamaño del batch (carga) de lechada de cal a producir. Los controles utilizan la cantidad deseada, calculan la cantidad de agua y la cantidad de cal necesaria para hacer el Batch. Primero, el agua fría en la cantidad predeterminada (volumetricamente ó gravimetricamente) es agregada al estanque batch. Entonces la cal viva es añadida en la cantidad predeterminada (volumetricamente ó gravimetricamente) al estanque Batch. La cal y el agua son agitadas y mezcladas hasta que la mezcla alcance una temperatura entre 170 y 180 °F (76,7 y 82,3 °C). Una vez que la temperatura es alcanzada, la lechada resultante es trasladada a un segundo estanque de uso ó para retirar arenillas dependiendo si se ha usado cal en polvo ó granulada.

Una vez que el estanque de apagado está vacío, el agua para el próximo batch es agregada al estanque de apagado y el sistema queda a la espera en *modo Stand By*, de que el operador inicie el próximo ciclo Batch. La Figura N° 4 muestra un apagador Batch para uso con cal en polvo. Los apagadores Batch son usados solo cuando sea necesario pequeños Batch periódicamente y cuando un apagador continuo no pueda ser usado.

*Figura N° 4*





## FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL OXIDO DE CALCIO (CaO)

Cómo se ha establecido previamente, el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es calentado en hornos de tipo rotatorios horizontales ó verticales para sacar el anhídrido Carbónico ( $\text{CO}_2$ ) del carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  para producir óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). Este proceso se llama “Calcinación”.

Las altas condiciones de temperatura a la que se realiza la calcinación, afectan la calidad del CaO resultante de este proceso. Los factores siguientes son los mayores determinantes de la calidad del CaO:

- A) Composición química de la caliza
- B) Temperatura del horno durante la calcinación
- C) Tiempo de permanencia del CaO en el horno calcinación
- D) La concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera del horno calcinación

### A) COMPOSICION QUÍMICA DE LA CALIZA

La composición química de la caliza no puede ser controlada sin un mayor impacto en el costo de fabricación, por lo tanto, las variaciones en su composición son generalmente aceptadas. La temperatura de Calcinación debe ser estrechamente controlada. Para calentar en forma uniforme y pareja la caliza dentro del horno secador, el tamaño de las partículas que se alimentan al calcinador deben ser relativamente uniformes. Además para permitir un tiempo de residencia largo en el horno secador, el tamaño de la partícula de caliza debe ser pequeña, típicamente es de 1½”. Sin embargo debido a la naturaleza de la operación de molienda, el rango del tamaño de partícula debe ser alrededor de ½. a 2”.

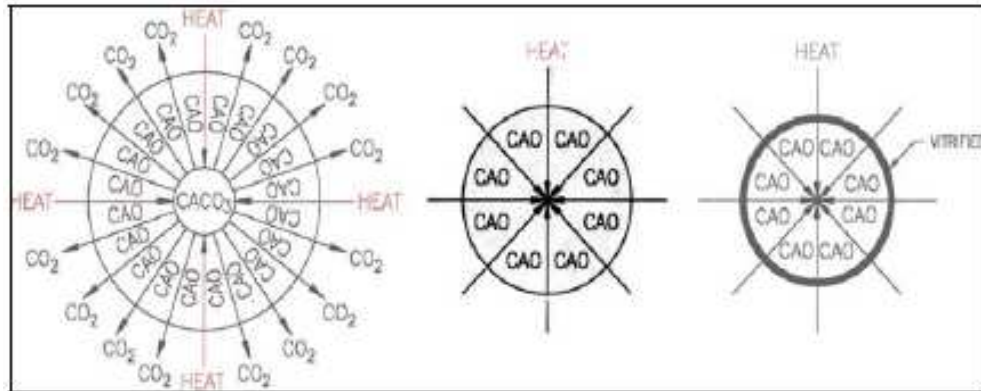
Considerando que el tiempo de permanencia o residencia y la temperatura del horno secador son constantes, la penetración del calor en las diferentes partículas será diferente atendiendo al tamaño de estas.

En **la Figura N° 5** se muestra una partícula grande en que el calor no penetra hasta el centro de esta quedando carbonato de calcio en el corazón de la partícula y recubierta por óxido de calcio, el centro de esta partícula es lo que llamamos arenilla.

Para las partículas de tamaño medio, el calor penetra en su totalidad completando la conversión de todo el carbonato en CaO.

En la partícula pequeña el calor llega rápidamente al corazón de la partícula y la cubierta de esta se sobre calienta formando una capa dura, donde el agua no puede penetrar, entonces el proceso de apagado es mayormente retardado o impedido.

Figura N° 5



En esta ilustración las partículas grandes y medianas, son de alta reactividad y se les denomina “soft-burned” y las partículas pequeñas son llamadas “Hard burned”.

## B) TEMPERATURA DE SECADO ( CALCINADO )

La temperatura del horno de secado afecta la calidad de la cal viva producida, por consiguiente el resultado de la lechada de cal producida en el apagador de cal.

Es deseable como producto final del proceso de formación de óxido de calcio, que las partículas sean de tamaño pequeño con una gran superficie específica.

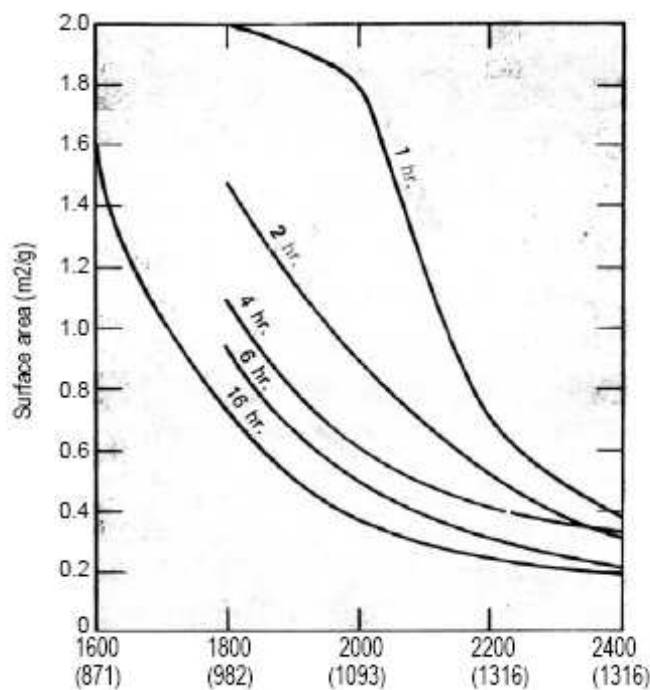
La figura N° 6 muestra el impacto de la temperatura del horno secador en los tamaños de las partículas y su área superficial, en la hidratación de las partículas de CaO.

Una partícula “Soft burner”, es aquella partícula que está llena de pequeñas cavidades y grietas que ha dejado el CO<sub>2</sub> al escapar de la caliza durante el proceso de calcinación.

Cuando esta partícula es expuesta a la acción del agua, esta penetra por las grietas y llena estas cavidades. La hidratación toma lugar rápidamente, liberando una gran cantidad de energía.

Este calor hace hervir el agua generando vapor, haciendo que las partículas revienten, exponiendo la superficie interna para la hidratación. Este proceso continúa hasta que la hidratación se completa

*Figura N° 6*



Temperatura de calcinación en °F (°C)  
Relación del Área Superficial v/s Temperatura de Calcinación

### C) TIEMPO DE RESIDENCIA

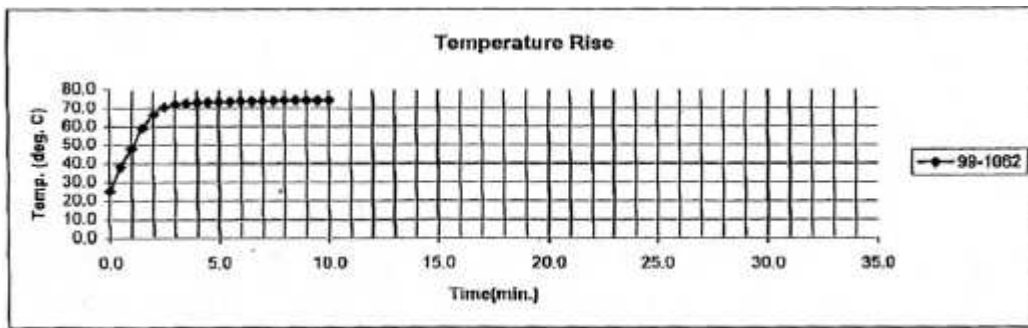
El tiempo de residencia del  $\text{CaCO}_3$  en el horno de secado es muy crítico durante el proceso de calcinación.

Es muy importante que el tiempo de residencia sea lo mas corto posible. Sin embargo, no obstante debe estar el tiempo necesario que permita que el calor penetre las partículas de  $\text{CaCO}_3$  y saque de estas el  $\text{CO}_2$ .

La calcinación puede hacerse con baja temperatura y largo tiempo de residencia, o alta temperatura y bajo tiempo de residencia. Cada fabricante de  $\text{CaO}$  debe establecer el tiempo de residencia y la temperatura de uso en sus sistemas de producción.

La **figura N° 7** muestra un gráfico tiempo/temperatura para “Soft burner hight reactive lime”, que es usado a menudo para medir la reactividad. En el estado anterior, la calidad de la caliza como el proceso de calcinación afecta la calidad del hidratado final.

*Figura N° 7*



## D) ATMOSFERA DEL SECADO ( CALCINADO )

Adicionalmente a la temperatura de secado y al tiempo de residencia, la atmósfera en que se produce el calcinado afecta la calidad del CaO.

En la medida que la temperatura aumenta en el  $\text{CaCO}_3$  el  $\text{CO}_2$  es liberado y se produce el CaO. El  $\text{CO}_2$  debe ser extraído del calcinador. El CaO tiene gran afinidad para absorber la humedad y el  $\text{CO}_2$  y volver nuevamente a formar  $\text{CaCO}_3$ .

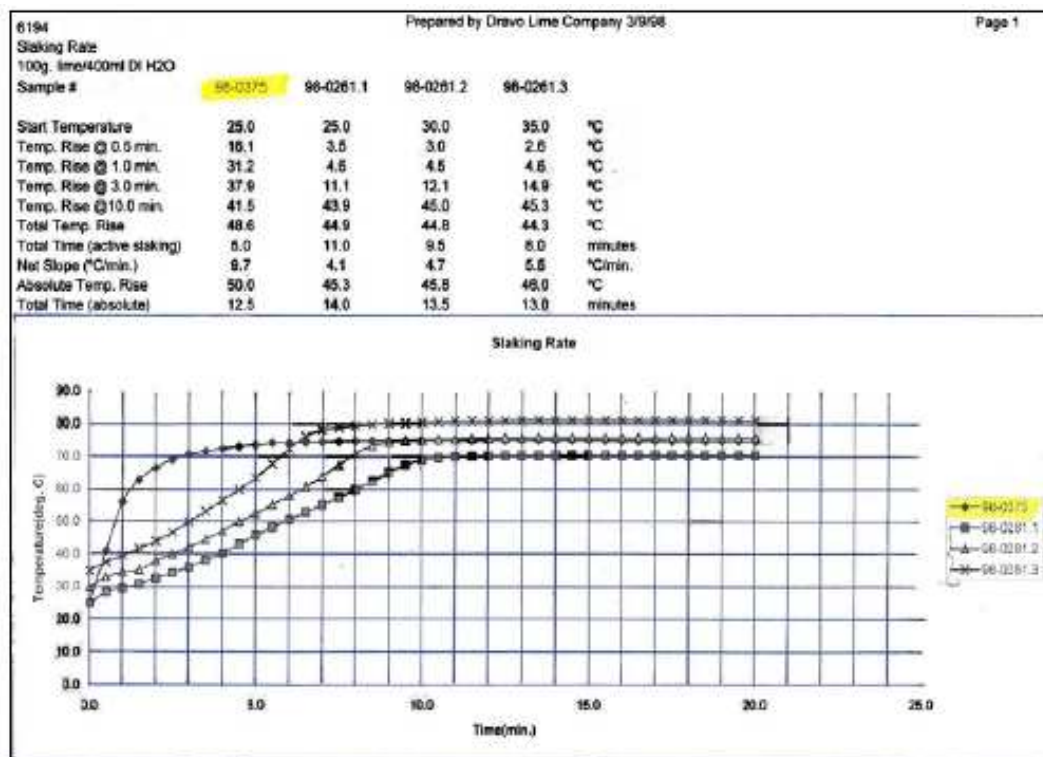
El efecto de esta reconversión es más pronunciado con las partículas pequeñas de CaO v/s las partículas grandes debido a la superficie específica de estos gránulos.

La **figura N° 8** muestra la relación de apagado para 4 diferentes tipos de CaO, suministrados por diferentes fabricantes.

Hay una gran diferencia en la reactividad de estas 4 muestras de CaO, entre la razón de incremento de la temperatura, y el tiempo requerido para completar el proceso de apagado.

Estas variables serán tratadas con más detalles en este trabajo, mas adelante.

*Figura N° 8*



## **FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE APAGADO**

El único factor y más importante que afecta la eficiencia en el sistema de apagado, es el área superficial específica de las partículas del hidróxido de calcio. Mientras mayor sea el tamaño del área superficial específica de hidratación, una mayor superficie estará disponible para la reacción, por lo tanto, una mayor eficiencia de reacción y menor consumo de CaO. La superficie específica del hidróxido de calcio tiene una gran variación bajo las variables descritas mas abajo. El rango típico de la superficie específica del hidróxido de calcio está entre 8000 y 58000 cm<sup>2</sup>/gr. Los datos empíricos muestran la relación existente entre el tamaño de la partícula hidratada y la superficie específica relación que no es lineal.

En la **figura N° 9** se muestran 10 diferentes tipos de CaO y su tamaño de partícula hidratada y su superficie específica. Estas figuras confirman una falta de correlación directa entre el tamaño de la partícula y la superficie específica

**Figura 9 \***

Muestra N°	Tamaño Partícula Micrones	Superficie Específica cm <sup>2</sup> /gr
1	2.9	110000
2	3.0	110000
3	2.5	9000
4	3.4	7000
5	3.9	9000
6	2.2	7000
7	2.2	5000
8	2.4	7000
9	2.2	6000
10	3.1	12000

Los siguientes factores afectan la eficiencia del apagado por el efecto de la superficie específica del hidróxido de calcio, directa o indirectamente.

- A) Tipo de caliza usada en la calcinación
- B) Proceso de calcinación para producir CaO
- C) Temperatura de Apagado
- D) Relación Agua ÷ CaO
- E) Grado de agitación durante el apagado
- F) Viscosidad de la lechada
- G) Tiempo de Apagado
- H) Temperatura del agua
- I) Apagado aéreo

## A) TIPO DE CALIZA

Los depósitos de Carbonato de Calcio generalmente no son puros. Ellos contienen muchos otros elementos, tales como magnesio, óxido de aluminio, y compuestos que afectan la calidad del hidrato producido partiendo de ese tipo de caliza. Los fabricantes de CaO no tienen control sobre las impurezas que vienen incorporadas en las vetas de la caliza.

## B) PROCESO DE CALCINACIÓN

Una apropiada temperatura y tiempo de residencia durante la calcinación tienen una gran influencia en la calidad del hidróxido producido. El problema más común asociado con el proceso de la calcinación es el llamado “*Hard Burned Lime*” (CaO cristalizado en su superficie). Cuando el CaO llega al estado de “Hard Burner Lime” se forma una capa impermeable alrededor de la partícula de CaO, haciendo dificultosa la penetración del agua para iniciar el proceso de apagado. Para apagar la partícula “*Hard Burned Lime*” la capa exterior debe ser desgastada hasta abrir los poros y permitir la penetración del agua. Esto se hace con una agitación vigorosa que permita la abrasión y ruptura de la capa externa de la partícula de CaO. Este tipo de CaO, normalmente requiere mayor tiempo de retención dentro del apagador. En la práctica, cuando se “*Hard Burned Lime*” la capacidad del apagador debe ser reducida hasta un 50% para minimizar la cantidad de CaO -“*Hard Burned Lime*” - que se pierde.

## C) TEMPERATURA DE APAGADO

La temperatura de apagado es el factor más importante que afecta el tamaño de la partícula y la superficie específica de las partículas hidratadas. Mientras más cerca este la temperatura de apagado de los 210 °F (98.96 °C) más fino será el tamaño de las partículas y más grande será la superficie específica de las partículas. Sin embargo, la relación entre la temperatura, el tamaño de partícula y la superficie específica, no es lineal.

En algunas instancias cuando el apagado se efectúa a altas temperaturas, alrededor del punto de ebullición del agua, pueden desarrollarse “Puntos calientes” (Hot Spots) pueden producirse dentro de la lechada de cal, lo que causa que partículas hidratadas se cristalicen y aglomeren formando partículas grandes y planas con una reducida superficie específica. Este problema es normal que aparezca en los apagadores de pasta, ya que ellos operan a altas temperaturas, y en áreas de agitación en que este no sea vigoroso.

Siempre desde un punto de vista teórico, son deseables temperaturas cerca de los 212 °F (100°C), pero desde un punto de vista práctico es muy dificultoso apagar satisfactoriamente a esta alta temperatura sin tener problemas de seguridad o efectos adversos debido a la aglomeración.

En el proceso de apagado temperaturas entre 170 °F (71.7°C) y 185 °F (85°C) son las más prácticas para una operación óptima.

El calor liberado debido a la reacción exotérmica es diferente para las diferentes calidades de CaO. Una **“High Reactive Soft-burned lime”** produce 490 BTU de calor por libra de CaO, Un CaO de baja reactividad produce alrededor de 390 BTU por libra de CaO.

Estas unidades calóricas (BTU) llevan la temperatura de la lechada a cierto grado de temperatura, y que dependen de la temperatura del CaO seco, la temperatura de entrada del agua, y el calor perdido desde el apagador.

La **figura N° 10** muestra la relación entre la temperatura de entrada del agua, la temperatura de entrada del CaO, y el calor perdido por los apagadores Chemco par una variación de capacidades de 500 – 1500 – 4000 - 5000 y 6000 lbs/hora, y la temperatura final de apagado deseada. Como se indica en la carta, para llegar a la temperatura final deseada algunas veces se necesitan calefactores auxiliares para aumentar el calor del proceso.

**La figura N° 10**

PROCESS PARAMETERS		CHEMCO LIME SLAKER DATA SHEET						17-JUL-92							
LIME TEMP.		50.0 (deg. F) = 10.0 (deg. C)													
INLET WATER TEMP.		38 (deg. F) = 3.3 (deg. C)													
RESULTS		System Inputs				System Outputs		Q REQ'D (lb/hr)							
Tank Temp (deg. F)	GENERATED (BTU/lb)	% Lime (BTU/lb)	% Water (BTU/lb)	% added (BTU/lb)	WATER (BTU/lb)	REQ'D (BTU/LB)	500	1500	3000	4000	5000	6000			
(deg. F)	(BTU/lb)	(BTU/lb)	(BTU/lb)	(BTU/lb)	(BTU/lb)	(BTU/LB)	(BTU/hr)	(BTU/hr)	(BTU/hr)	(BTU/hr)	(BTU/hr)	(BTU/hr)			
130.0	490.0	3.5	21.0	515.0	355.7	-189.4									
140.0	490.0	3.5	21.0	515.0	391.9	-129.1									
150.0	490.0	3.5	21.0	515.0	428.2	-86.8									
160.0	490.0	3.5	21.0	515.0	464.5	-50.5									
170.0	490.0	3.5	21.0	515.0	500.8	-14.2									
180.0	490.0	3.5	21.0	515.0	537.1	22.1	11045.4	33136.7	66273.5	88364.7	110455.0	132547.0			
							3.2	9.7	19.4	25.9	32.4	38.0			
130.0	435.0	3.5	21.0	459.5	355.7	-103.9									
140.0	435.0	3.5	21.0	459.5	391.9	-67.6									
150.0	435.0	3.5	21.0	459.5	428.2	-31.3									
160.0	435.0	3.5	21.0	459.5	464.5	8.0	2495.3	7485.0	14971.0	19962.1	24952.7	29943.2			
170.0	435.0	3.5	21.0	459.5	500.8	41.3	6.0	18.1	36.3	48.4	60.5	72.6			
180.0	435.0	3.5	21.0	459.5	537.1	77.4	11.4	34.1	68.2	90.9	113.7	136.4			
130.0	380.0	3.5	21.0	404.5	355.7	-48.9									
140.0	380.0	3.5	21.0	404.5	391.9	-12.6									
150.0	380.0	3.5	21.0	404.5	428.2	23.7	11049.0	33549.5	67099.0	89498.7	110498.4	132198.1			
160.0	380.0	3.5	21.0	404.5	464.5	60.0	3.5	10.4	20.9	27.8	34.7	41.7			
170.0	380.0	3.5	21.0	404.5	500.8	96.3	29995.3	89985.0	179971.6	239962.1	299952.7	359943.2			
180.0	380.0	3.5	21.0	404.5	537.1	132.6	0.8	26.4	52.7	70.3	87.9	105.5			
							48140.7	144422.1	280844.1	368125.5	481406.9	577688.3			
							14.1	42.3	84.7	112.9	141.1	169.3			
							66280.1	198850.4	397716.7	530289.9	662851.2	795433.4			
							19.4	58.0	116.6	155.4	194.3	233.1			

Las **Figuras N° 11 y N° 12** muestran un balance calorífico para un apagador Chemco de 6000 lb/hr, con alimentación de CaO de alta reactividad ( 490 BTU ) y entrada de CaO seco a una temperatura de 65 °F (18.3°C) y entrada de agua a una temperatura de 38 °F (3.3°C). De acuerdo a esta carta, cuando el apagador está funcionando a un ritmo de 350 lb/hr y la temperatura requerida de apagado es 160 °F (71.7°C), el proceso genera calor, el que no es suficiente para mantener una temperatura de apagado de 160 °F (71.7°C), por esto necesita calor auxiliar. Este calor auxiliar llega de una fuente externa, tales como agua calentada o una fuente interna, tal como aumentar la velocidad de alimentación del CaO a rangos de 400 a 500 lb/hr.



Como dependemos del calor de reacción para que nos provea la temperatura de apagado deseada, sumado además la temperatura del agua de entrada, la relación CaO ÷ Agua, también afecta la temperatura final del apagado.

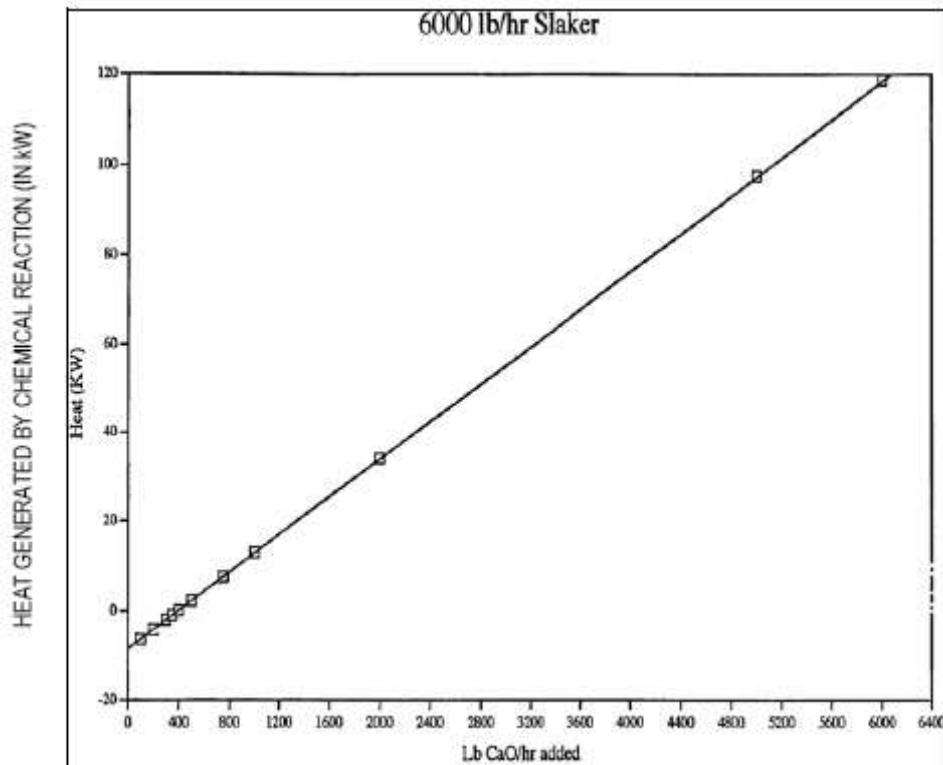
Figura N° 11

New Lime Slaker Calculations				14-Jan-93		Slaker Size		6000 (lb/hr Ideal)	
Process Parameters:				Dimensions:		Constants:			
Temperatures:						Air:			
Lime Inlet	65 (deg F)				Density	1.164 (lb/ft <sup>3</sup> )			
Water Inlet	38 (deg F)				Cp	1.012 (J/kgK)			
Air Ambient	70 (deg F)				K	0.025 (W/mK)			
Reop'd Reaction (Air Out)	160 (deg F)				μ	1.628-05 (kg/m <sup>2</sup> )			
	100 (deg F)				ν	1.875-05 (m <sup>2</sup> /s)			
Dimensions:						Pr			
Surface Area	2916 (in <sup>2</sup> )				Re	2332.063			
Volume	600 (gal)				hc	0.303 (W/m <sup>2</sup> K)			
A (Exom deg)	16.875 (in)				K Glass				
Height	47.828 (in)				0.4 (BTUin/hrft <sup>2</sup> F)				
Wall thk	1.428 (in)				K Steel				
Insulation thk	0.250 (in)				26 (BTUin/hrft <sup>2</sup> F)				
Steel thk	0.250 (in)				Cp Water In				
					1.001 (BTU/lbF)				
					Cp Water Out				
					0.977 (BTU/lbF)				
					Cp Ca(OH) <sub>2</sub>				
					0.526 (BTU/lbF)				
Lime Inlet Rate									
Volumeetric Air Flow	3.5								
Heat Contact of Lime	100 (#/hr)								
	75 (ft <sup>3</sup> /min)								
	490 (BTU/#)								
Q Water (BTU/hr)	Q Lime (BTU/hr)	Q Generated (BTU/hr)	Q Water (BTU/hr)	Q Air (BTU/hr)	Q Wall (BTU/hr)	(Positive means add energy)			
505.426	650	45000	4834.144	13306.0	2515.443	-11794.060 (Btu)			
Totals						-5.211 (Btu)			
Case	#CaO/hr	Q <sub>W</sub>	Q <sub>air</sub>	Q <sub>Wall</sub>					
1	5000	126.893	148.763	118.730					
2	5000	120.577	123.024	57.553					
3	1000	246.118	494.207	34.028					
4	750	194.057	180.533	7.984					
5	500	132.056	129.798	2.200					
6	400	108.416	108.804	0.142					
7	350	85.440	92.169	-0.917					
8	300	79.225	81.210	-1.878					
9	200	52.873	58.916	-6.093					
10	100	28.412	32.622	-6.230					

NOTES: Changing inlet water temperature and/or Reaction Temperature must be accompanied by the corresponding changes to Cp for water at these different temperatures to maintain accuracy

Figura N° 12

CALOR GENERADO POR EL APAGADO  
 T° DE LA CAL 65 °f (18,34) T° AGUA 38 °f (3,34 °C)  
 CALOR GENERADO 490 BTU/lb



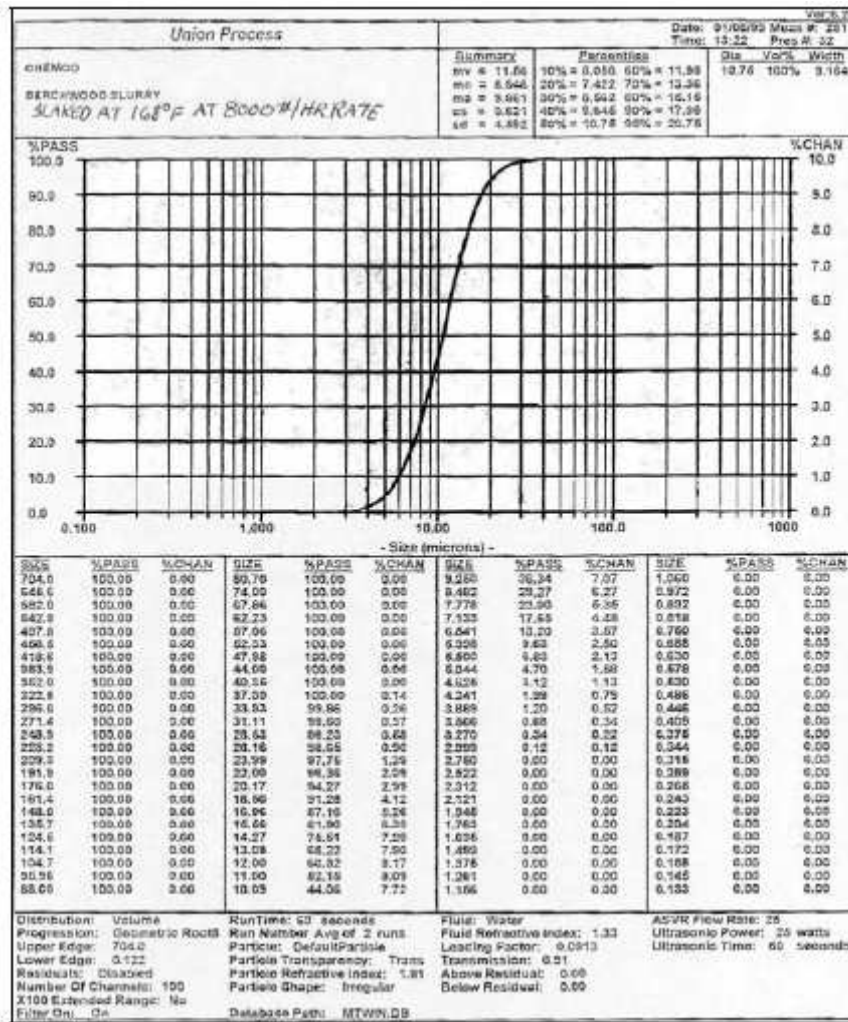
Como se ha establecido anteriormente la temperatura óptima para el proceso de apagado, varía de trabajo en trabajo, dependiendo de los equipos y de las condiciones del sitio de trabajo.

Desde que la temperatura es el factor más importante que afecta la superficie específica, el control de la temperatura es esencial para tener un producto de calidad uniforme. Controlar el proceso de apagado por medio de la relación CaO ÷ Agua, o la consistencia o densidad de la lechada no es el mejor camino, ya que las variables como la reactividad de la cal, la temperatura de entrada del agua y la temperatura de la cal, dan resultados variados en la calidad de la hidratación.

El camino óptimo para controlar el proceso de apagado es por el control de la temperatura de apagado por la variación de la relación cal ÷ agua como sea necesario.

La figura N° 13 muestra la distribución de partículas por tamaño del hidróxido de calcio, apagado en un apagador de 8000 lb/hr con el control de temperatura operando a 168 °F (75.6°C) . El 95% de las partículas de hidróxido de cal están entre 3 y 11 micrones

Figura N° 13



## D) RELACIÓN CAL ÷ AGUA

La relación Cal ÷ Agua también afecta el tiempo de apagado por efecto de la temperatura de apagado. Mientras más alta es la temperatura del proceso de apagado, más corto es el tiempo de apagado.

Controlando constantemente la relación Cal ÷ Agua en el proceso de apagado no garantiza una temperatura constante. La temperatura variará de acuerdo a la variación de la temperatura del agua, la reactividad de la cal, y la calidad del agua, lo que requiere que el operador la esté frecuentemente ajustando. En la situación anterior el mejor camino para mantener una relación correcta de Cal ÷ Agua es controlar la temperatura del apagado. Pruebas de apagado para una misma cal con diferentes relaciones de agua muestran una significativa diferencia en la relación de sedimentación. En ambos casos las muestras llegaron a ajustes de 50% de su volumen \*.

Relación Cal ÷ Agua	Tiempo sedimentación de 50% (Min)
• Cal apagada con una cantidad Mínima teórica de agua	10
• Cal apagada con una cantidad 10 veces la teórica de agua	440

Esto indica claramente que un exceso de cantidad de agua usada en el proceso de apagado dará como resultado partículas pequeñas, asumiendo que la temperatura de apagado fue la misma.

## E) GRADO DE AGITACIÓN

El grado de agitación durante el proceso de apagado tiene impacto en el producto final. Una agitación muy pequeña da como resultado temperaturas disparejas, lo que produce en la cámara de apagado partículas frías y partículas calientes. Las partículas calientes resultan cuando el apagado se hizo a una temperatura superior a 212 °F (100°C). Apagar a estas temperaturas da como resultado cristales hexagonales<sup>2</sup> de gran tamaño y una reducida área superficial, y aglomeración de partículas. Las partículas frías dan como resultados partículas de cal sin hidratar.

## F) VISCOSIDAD DE LA LECHADA

La viscosidad de la lechada de cal puede tener una gran variación de una cal a otra, como también de las condiciones del proceso. Ciertos cambios en las condiciones de hidratación o impurezas en la cal incrementaran la viscosidad de la lechada de cal, afectando el tiempo de sedimentación. Algunas veces la viscosidad crece con temperaturas de apagado de 180 °F (82°C) y superiores a esta.

La relación que existe entre la viscosidad, el tamaño de la partícula, la superficie específica y la relación de sedimentación, no ha sido investigada como se hace ahora. En general se presume que la alta viscosidad es producto del tamaño pequeño de las partículas del hidróxido, la gran superficie específica y la cantidad de sedimento<sup>1</sup>.

Variaciones de viscosidad de la lechada de hidróxido de calcio han sido informada entre rangos de - 45 – 700 - centipoises.

### **G) TIEMPO DE APAGADO**

El tiempo de apagado, es el tiempo requerido para completar el proceso de hidratación. Este tiempo varía de una cal a otra. Una cal de alta reactividad se hidrata completamente en 2 – 3 minutos. Una cal de reactividad media se hidrata completamente en 5 – 10 minutos. Una cal de baja reactividad, con hard burnes lime, y cal con magnesio se hidrata en 15 – 30 minutos. El resultado en terreno dependerá grandemente de las condiciones de este. Referirse a las *Figuras N° 7 y N° 8* para mayores detalles.

### **H) COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA**

La composición química del agua es un factor mayor en el proceso de apagado. La presencia de ciertos productos químicos en la composición del agua de apagado, pueden acelerar a retardar el proceso de apagado.

El agua con alto contenido de sólidos disueltos causan generalmente excesiva espuma, lo que motiva problemas operacionales. El agua que contiene sobre 500 Mg/litro de sulfatos ó sulfitos son inadecuadas para el proceso de apagado. Esto es para los apagadores de tipo “Pasta” y “Slaker”. En los apagadores tipo molino de bolas, la presencia de sulfatos y/o sulfitos no afectan en demasía el proceso de apagado por su facilidad de moler las partículas de cal.

Los sulfatos o sulfitos cubren la superficie de la cal y no permiten que el agua penetre los poros de las partículas, por lo tanto el proceso de apagado es largamente demorado. Para apagar la cal bajo estas condiciones de partículas, necesitan ser golpeadas continuamente golpeadas para exponer nuevas superficies de la partículas a la acción del agua y producir el apagado.

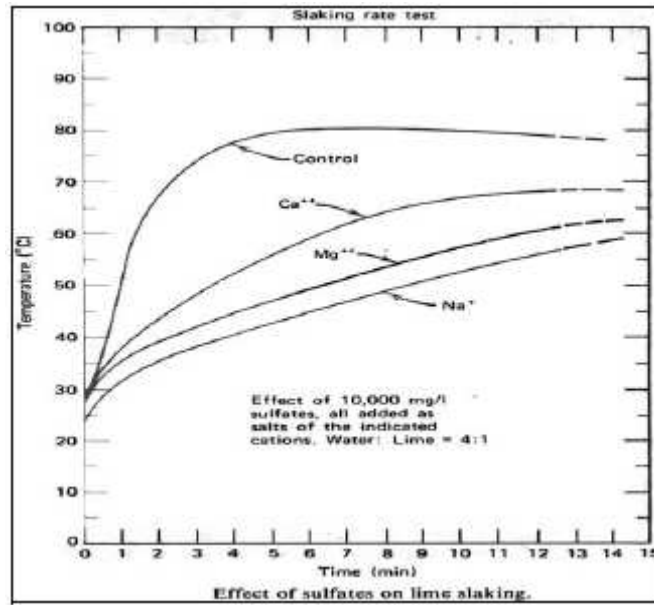
La *Figura N° 14* muestra el efecto del crecimiento de la temperatura v/s tiempo de demora de apagado con aguas que contienen sulfatos.

Algunos productos químicos aceleran el proceso de apagado estos son los cloruros y el azúcar.

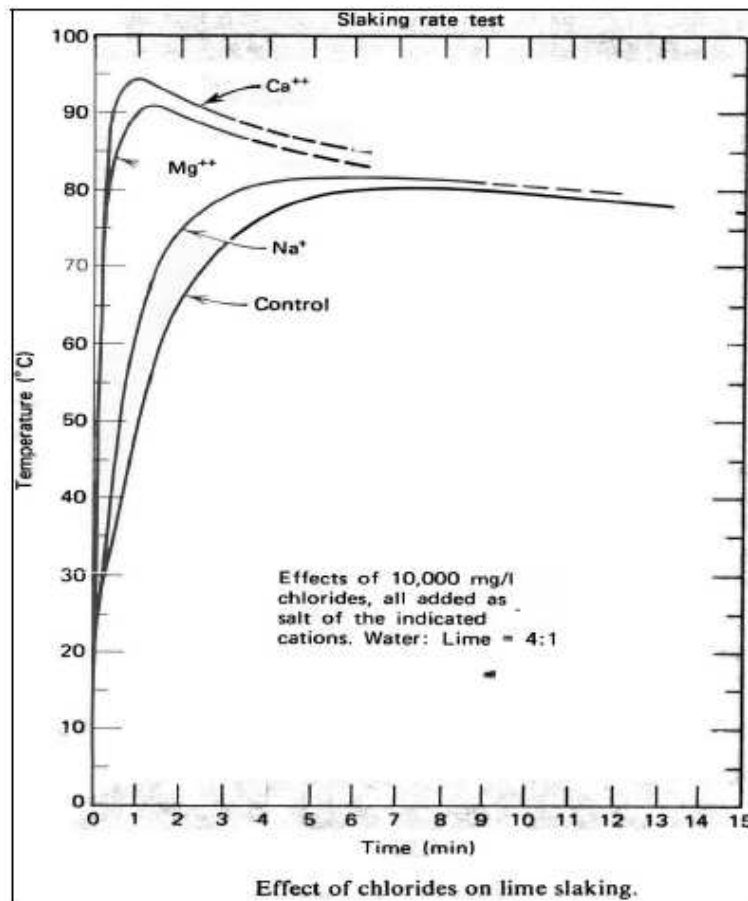
La *figura N° 15* muestra el efecto de los cloruros del agua en el proceso de apagado.

*El agua del mar puede ser usada efectivamente para el proceso de apagado. Sin embargo el material de construcción del apagador debe ser adecuado para la corrosión causada por los cloruros.*

*Figura N° 14 \**



*Figura N° 15 \**



## **I) TEMPERATURA DEL AGUA.**

La temperatura del agua de apagado tiene gran influencia en el proceso de apagado y la superficie específica de las partículas hidratadas. La temperatura de entrada del agua de apagado y la relación de cal ÷ agua tiene un efecto inverso en el tiempo de apagado.

El agua fría, no debe contactar la cal seca en el apagador. El agua y la cal deben entrar separados al apagador para que tome tiempo el contacto del agua con la cal, si la temperatura ha llegado sobre los 150 °F (65.5°C). Si el agua fría y la cal se ponen en contacto, se generará una condición llamada “Drowning” (sumergido). Las partículas de hidrato formadas bajo la condición “Drowning” son muy gruesas y no son muy reactivas.

## **J) APAGADO AÉREO.**

El apagado aéreo es generado por la hidratación del CaO, con la humedad del aire a la temperatura ambiente. Las partículas finas de cal viva son las más propensas al apagado aéreo y esto se debe a su gran superficie específica. El apagado aéreo no solo produce partículas extremadamente grandes de hidróxido, sino que también convierte óxido de calcio en carbonato de calcio debido a la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. El apagado aéreo no produce mucho calor (BTU) durante el apagamiento y aumenta el consumo debido a la pérdida de reactividad.

## **RESUMEN**

**El proceso de Apagado de Cal Viva es un proceso crítico, el cual generalmente no es lo suficientemente conocido por la gente que opera los equipos. El método y tipo de control usado para el Apagado afecta grandemente la eficiencia del proceso. Además la calidad de la cal viva, la temperatura en que se realiza el apagado afecta la calidad de la lechada de cal producida. Es esencial tener la instrumentación apropiada para mantener una apropiada temperatura de apagado y la relación de cal ÷ agua en un rango cierto.**

## **REFERENCIAS**

**El autor de este trabajo agradece la valiosa información obtenida de las siguientes referencias:**

- 1. T.C. Miller, “A study of reaction between Calcium Oxide and Water ”,**  
Publicado por “ National Lime Asociation, Washington D.C.
- 2. E.F. Hively, “Practical Lime Slaking ”,**  
Alis Mineral System Grinding Division.
- 3. Wire and Wire Products, October 1995**
- \* Robert S. Boyton “ Chemistry and Technology of Lime and Limestone ”,**  
Second Edition, John Wiley & Sons.