

## CALES HIDRAULICAS CON COMPONENTES PUZOLANICOS

Joaquín PORRERO\*

### RESUMEN

*Para la obtención de cales hidráulicas es de gran interés poder aprovechar el mayor número posible de tipos de materias primas. En este sentido ofrece posibilidades interesantes la fabricación de cales puzolánicas. En este trabajo se indican las limitaciones de las calizas adecuadas para obtener cales hidráulicas, y se comentan algunas de las principales particularidades del mecanismo de obtención de cales puzolánicas.*

*Como ejemplo de aplicación de las teorías expuestas se muestra el caso de una caliza que no se consideraba apta para obtener cal hidráulica, pero que se logró aprovechar para fabricar cal puzolánica de calidad aceptable.*

*El estudio de las posibilidades de esta materia prima y las pruebas hasta escala piloto se hicieron en el IDIEM. La cal se está obteniendo industrialmente, desde hace año y medio, en la nueva fábrica de SOPROCAL en Melipilla.*

### INTRODUCCION

Las materias primas para obtener cales hidráulicas, son calizas que, además del carbonato de calcio, llevan una proporción importante de otros materiales, principalmente silíceos o arcillosos. Estos materiales, al reaccionar con la cal durante la cocción, dan lugar a la formación de componentes hidráulicos. Cuando estos componentes son los constituyentes fundamentales de la cal hidráulica, se obtiene entonces un producto que aquí designaremos en general como "cal combinada"

Los materiales ácidos (silíceo-arcillosos) de la caliza, pueden también no combinarse con la cal en la cocción, pero pueden quedar con capacidad para

---

\*Licenciado en Ciencias Químicas. Jefe de la Sección de Investigación Química del IDIEM.

hacerlo en el seno del agua de amasado durante la hidratación de la cal, por una reacción de tipo puzolánico. A las cales constituidas fundamentalmente por materiales con esta capacidad de reacción, las llamaremos "cales puzolánicas".

Si se favorece adecuadamente la posibilidad de reacciones de tipo puzolánico, es posible aprovechar con éxito muchas materias primas poco aptas para obtener cales combinadas. Esto permite ampliar los tipos de calizas utilizables, lo que es importante en todos los casos, y puede ser decisivo en partes que, como la zona central de Chile, son escasas en calizas fácilmente accesibles y económicamente explotables.

### CALES COMBINADAS

Los componentes hidráulicos formados por combinación durante la cocción, son principalmente silicatos, silicoaluminatos y aun aluminatos de calcio. Para lograr producirlos en la cantidad y de la calidad apropiadas para obtener cales combinadas, es necesario partir de calizas con unas características que esencialmente son: composición química adecuada, grano fino y homogeneidad.

La reacción de combinación que da lugar a estos componentes, se efectúa en estado sólido o casi sólido, para lo que se requiere que los materiales reaccionantes se encuentren muy finamente divididos e íntimamente mezclados. Si los granos son gruesos, no reaccionará más que su parte periférica — en los puntos de contacto — quedando el interior del grano como un núcleo intacto. Aún más, en gran parte de esta zona periférica combinada no se llega a alcanzar el equilibrio en la reacción: En la parte de dicha zona correspondiente al grado de material silíceo-arcilloso, los componentes formados serán altamente ácidos, y en la correspondiente al grano calizo, los componentes serán muy básicos.

Se suele estimar que, por cocción a temperatura y durante tiempo económicamente convenientes, sólo se pueden hacer reaccionar hasta el equilibrio total los granos de tamaño inferior a los 0,15 mm.

Cuando en la caliza es adecuada la proporción entre los materiales que la forman, y los granos de estos son finos, se obtiene mayor cantidad de componentes hidráulicos cuanto mayor es la homogeneidad. El caso ideal sería el de una caliza con la composición química de un crudo de cemento portland, con todos sus granos de tamaño inferior al indicado y totalmente homogénea en toda su masa; con ella se podría obtener directamente clínquer de cemento portland. Al alejarse de estas condiciones, disminuye la proporción de com-

ponentes hidráulicos que se logra, o cambia la calidad de estos a más básicos o a más ácidos.

La heterogeneidad de las calizas se manifiesta por zonas de composiciones distintas. El tamaño, número y forma de estas zonas, pueden ser cualesquiera. Son muy frecuentes las cales en que los componentes hidráulicos provienen de estratos, bolsas, retículos, etc. de la materia prima, constituyendo el resto un material de relleno que aporta al producto acabado características que pueden ser o no beneficiosas.

Cuando la proporción y calidad de los componentes hidráulicos que es posible obtener baja de ciertos límites, entonces la materia prima no es adecuada para la fabricación de cales combinadas.

Lo dicho implica que para determinar la calidad de una materia prima, haya que relacionar la composición y estructura de las zonas distintas que presente el material.

Cuando se estudian calizas para obtener cales combinadas puede parecer sorprendente que en la práctica sea posible lograr cales de mejor calidad con algunas materias primas que en principio parecen menos aptas. Esto se debe a varios factores:

La cantidad y calidad de los componentes hidráulicos inciden directamente sobre las resistencias mecánicas del producto, pero ésta no es la única propiedad por la que son valiosas las cales: incluso, por encima de ciertos límites tal propiedad es secundaria. Propiedades importantes como posibilidad de retención del agua de amasado, plasticidad, adherencia a los materiales que debe unir, la baja retracción, etc., pueden deberse principalmente — y de hecho así sucede en general — a componentes hidráulicos de poca calidad en cuanto a dar resistencias mecánicas, o, más frecuentemente, a los materiales no combinados.

Por otro lado, las resistencias mecánicas del producto pueden deberse en parte a reacciones del tipo puzolánico indicado, las que en mayor o menor grado, se producen en todas las cales como efecto secundario (incocidos, ultrafinos ácidos de apagado, etc.)

## CALES PUZOLANICAS

Las características de las cales que aquí designamos como puzolánicas, son distintas en algunos aspectos de las que tienen las cales combinadas, pero su calidad puede ser excelente. Constituyen lo que en un sentido menos amplio se conoce tradicionalmente como cales romanas.

Como en la formación de este tipo de cales no es necesario que durante

la cocción las distintas partículas estén en íntimo contacto, no se requiere tampoco que la materia prima sea homogénea y tenga gran fino. Debe en cambio cumplir un requisito que no se exige para las cales combinadas: los materiales ácidos han de tener gran reactividad puzolánica después del tratamiento térmico indispensable a que hay que someter la cal. En todo caso, el aprovechar este tipo de cales da lugar a que se amplíe considerablemente el número de yacimientos de caliza utilizables como materia prima.

En el mecanismo de formación de este tipo de cales destacan algunas particularidades:

La cal reaccionante puede ser la obtenida en la descarbonatación y apagado, o la proveniente de la hidrólisis de los componentes hidráulicos formados en la cocción; pero también pueden actuar como reactivo básico estos mismos componentes directamente.

Si está suficientemente dividido, cualquier material silíceo y aun ácido puede combinarse en mayor o menor grado con la cal. En la práctica, no obstante, el material sólo es útil si su reactividad es alta a un tamaño de grano económico. Es importante tener en cuenta que pueden aparecer en el producto (y hasta cierto punto es posible favorecer su formación) cantidades importantes de material ácido ultrafino disgregado por el apagado.

La cocción, indispensable para por lo menos transformar el carbonato, influye sobre la actividad de los materiales acompañantes en un grado e intensidad difíciles de prever: la puede crear o destruir, aumentar o disminuir. Sin embargo, es bastante posible que a temperaturas muy poco por encima de la necesaria para la descarbonatación, la actividad de la mayor parte de los componentes puzolánicos quede destruida.

Con el objeto de averiguar esta influencia de la temperatura en la actividad, en el IDIEM hicimos algunas pruebas, que no son concluyentes porque el número de materias primas que se estudió era limitado, y porque quedan dudas de si la actividad pudo haber sido afectada por los métodos empleados para separar el material puzolánico del calizo (separación densitaria o disolución en ácido); no obstante, todos los materiales que fue posible separar a mano, por consistir en zonas de tamaño suficiente, perdían totalmente su actividad cuando se calentaban por encima de 1.000°C el tiempo suficiente, y todas las cales puzolánicas, perdían resistencias mecánicas a esas temperaturas.

Es muy posible que influya también en la pérdida de actividad, el que las partículas puzolánicas más finas — y por lo tanto más activas — se aglomeren al elevar la temperatura. Pero también es posible que la disgregación de apagado origine partículas ácidas activas, incluso cuando el producto haya sido calcinado a temperaturas relativamente altas.

Como el calentamiento (temperatura — tiempo) necesario para formar componentes hidráulicos en la cocción, requiere una temperatura bastante más alta que la descarbonatación, sucede que cuando de una caliza se quiere obtener la mayor proporción posible de aquellos componentes, puede quedar inactivo un material puzolánico valioso. Por el contrario, la calcinación a la baja temperatura necesaria para preservar la actividad puzolánica, no es suficiente para formar los componentes hidráulicos que podrían aumentar la calidad del producto.

De todas formas, en la práctica lo general es que haya que decidirse por uno u otro de estos tratamientos extremos, ya que los grados intermedios reúnen las desventajas de aquéllos, sin que frecuentemente — y hasta se podría decir que en general — haya otro tipo de acciones que las compensen.

La elección depende de las posibilidades de cada caso en particular, entre las que hay que incluir la economía del proceso, y sólo es aconsejable decidir basándose en pruebas prácticas. El mayor conocimiento del material en estudio y la acertada interpretación previa de su posible comportamiento, facilitan grandemente el planeamiento de las pruebas, explican los resultados obtenidos y permiten hacer con más facilidad cambios que mejoren el producto. No obstante, es conveniente explorar prácticamente todos los tipos de tratamiento posibles, aunque no es necesario hacer ensayos sistemáticos dentro de cada uno de ellos. Algunas calizas aptas para producir cales combinadas pueden también dar cales puzolánicas de buena calidad, con gran economía en el proceso.

### UN EJEMPLO DE CAL PUZOLANICA

Como un ejemplo de las posibilidades que encierra el mecanismo puzolánico descrito, damos el de una cal cuya materia prima fue estudiada integralmente en el IDIEM, y que actualmente se está produciendo con éxito, desde hace ya un año y medio, en la nueva planta de la firma SOPROCAL, instalada en Melipilla.

Como antecedente de la materia prima se nos había indicado una composición química apropiada, pero con una distribución heterogénea de los materiales constituyentes, en granos de un tamaño que hacía que se la considerara inadecuada para obtener cal hidráulica.

La materia provenía de una zona relativamente amplia, pero nuestro estudio se centró en el yacimiento identificado como Viluma, que se estimó como el de más conveniente explotación. De él se tomaron varias muestras, de las cuales nos referiremos a las dos que consideramos más representativas, por ser

muestras medias de cantidades grandes del material y provenir de lotes distintos (Muestras 1 y 2).

Los análisis químicos del material (en la Tabla I se da el de las dos muestras citadas) confirmaron que su composición media era apropiada para obtener cales hidráulicas e indicaron que las distintas partes del yacimiento eran bastante homogéneas entre sí.

TABLA I

COMPOSICION DE DOS MUESTRAS DE CALIZA DEL YACIMIENTO VILUMA  
Análisis químicos e interpretación de la composición mineralógica probable, %

	Muestra	
	1	2
Pérdida por calcinación (1.000°C)	33,29	32,59
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	14,17	14,91
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,98	6,32
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,96	1,05
Cal (CaO)	42,29	41,09
Magnesia (MgO)	0,12	0,37
No dosificados (Diferencia a 100)	3,19	3,67
Carbonato cálcico (CaCO <sub>3</sub> )	75,4	73,3
Carbonato magnésico (MgCO <sub>3</sub> )	0,3	0,8
Sílice y silicatos	21,1	22,3
Otros	3,2	3,6

La roca es de color gris oscuro a negro, con pequeños cristales de calcita blanca con su brillo característico. No presenta otro tipo de heterogeneidad importante

Se lixiviaron varios trozos con ácido clorhídrico por tratamientos repetidos y cuidando de no deteriorar el material, lo que dejó un esqueleto insoluble, negro, de aspecto esponjoso, parecido a ceniza, frágil a la presión de los dedos y que al deshacerlo se convierte en gran parte en un polvo fino. Los poros dejados por la calcita disuelta, van desde muy pequeños hasta más de 1,5 mm de diámetro medio. (Fig. 1).

Esta prueba ya nos permitió suponer que la materia prima tenía grandes probabilidades de ser apta para la obtención de cal puzolánica de buena calidad. El que el carbonato de calcio se encuentre acumulado en granos relativamente gruesos, indica que entre los finos ácidos tiene que ser muy baja la concentración del material básico y, por lo tanto, que sería difícil obtener en la calcinación componentes hidráulicos de buena calidad, o sea, que en principio el material era poco apropiado para obtener cal combinada.

Se hizo una primera prueba de calcinación en las condiciones que estimamos óptimas: temperatura baja (900°C) y tiempo suficiente para lograr un alto por-

centaje de descarbonatación (1 ½ horas).

Una vez apagado y molido el producto, se obtuvo una cal con índices de calidad buenos.

Después, como es natural, se hicieron muchas pruebas cambiando las condiciones para ver si se lograba mejorar el producto. Estas cales se valoraron por sus resistencias mecánicas, no consiguiéndose superar sensiblemente las que había dado el primer ensayo.

Para determinar la influencia de la temperatura sobre la proporción de materiales que se logra combinar, se prepararon muestras haciendo actuar como única variable la temperatura máxima de calcinación. Se vio con estos ensayos como a temperatura alta es posible combinar prácticamente el total del material ácido. En la Tabla II damos los análisis químicos y una interpreta-

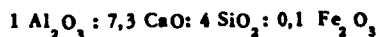
TABLA II

COMPOSICION DE CALES OBTENIDAS A DISTINTAS TEMPERATURAS

Análisis químicos e interpretación de la composición mineralógica probable, %. Velocidad de calentamiento de 1.000°C/h y permanencia de 10 minutos a la temperatura indicada en cada caso.

Temperatura	900°C	1.000°C	1.100°C	1.200°C	1.300°C
Pérdida por calcinación (1.000°C)	18,0	16,9	16,0	14,1	10,6
Cal (CaO)	52,2	52,8	53,2	54,5	56,6
Cal libre	38,5	37,0	36,8	34,9	22,7
Anhidrido carbónico (CO <sub>2</sub> )	5,6	5,1	3,5	2,0	1,9
Humedad	0,0	0,0	0,8	0,9	1,4
Residuo insoluble	19,8	17,9	12,5	7,2	0,85
Humedad	0,0	0,0	0,8	0,9	1,4
Calcita cruda (CaCO <sub>3</sub> )	12,8	11,6	8,0	4,6	4,3
Componentes hidráulicos*	12,6	17,7	26,0	37,0	59,1
Cal apagada (Ca[OH] <sub>2</sub> )	50,9	48,8	48,5	46,1	30,0
Material tipo puzo-					
lana	19,8	17,9	12,5	7,2	0,8
Otros	3,9	4,0	4,2	4,2	4,4

\*Las relaciones moleculares aproximadas, entre los óxidos son:



ción de la posible composición mineralógica, de una serie de estos ensayos que corresponde a una velocidad de calentamiento de 1.000°C/h y permanencia de 10 minutos a la temperatura máxima indicada.

En la muestra de 1.300°C, las relaciones moleculares aproximadas son: 1 de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 7,3 de CaO; 4 de SiO<sub>2</sub>; 0,1 de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

A pesar de la gran proporción de componentes combinados a las temperatu-

ras altas, las resistencias mecánicas disminuyen a medida que aumenta la temperatura de calcinación. O sea, aparecen como preponderantes las resistencias debidas al mecanismo puzolánico – creemos que influidas por la pér-

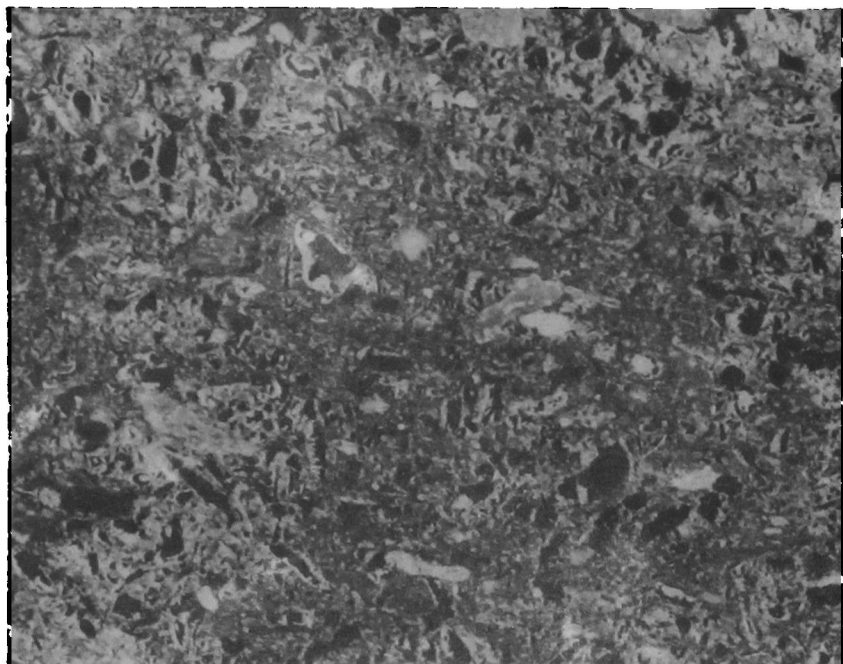


Fig. 1. Aspecto del esqueleto silíceo y de los huecos dejados por la calcita, en la lixiviación clorhídrica de la caliza Viluma. Ataque sobre una superficie pulimentada. Aproximadamente 4 aumentos.

TABLA III

RESISTENCIAS MECANICAS DE CALES OBTENIDAS A DISTINTAS TEMPERATURAS  
Método de ensayo DIN 1.060 con A/C = 0,5 y arena del Maipo. Medias de 5 probetas

Temperatura °C	Resistencias			
	Flexión, kg/cm <sup>2</sup>		Compresión, kg/cm <sup>2</sup>	
	7 días	28 días	7 días	28 días
900 (P)*	7,4	19,7	21,3	63,0
900	7,0	21,1	21,4	62,3
1.000	7,2	20,0	22,1	64,0
1.100	5,6	19,3	17,8	60,1
1.200	4,5	18,5	14,4	52,5

\*Muestra de la primera prueba.

didada de actividad del material ácido por encima de los 1.000°C.

En la Tabla III damos las resistencias mecánicas de cales obtenidas en horno estático en condiciones análogas a las de los ensayos de la Tabla II:



Las temperaturas son las mismas y los tiempos son los que estimamos equivalentes considerando la mayor cantidad de material empleado (1.000°C/h y permanencia de 30 minutos a la temperatura indicada).

Se incluyen además en la Tabla III las resistencias mecánicas de la primera muestra ensayada (muestra P).

Las resistencias mecánicas se determinaron en mortero con relación agua/cal = 0,5; empleando arena del Maipo apropiada para morteros y homogénea, y ciñéndose en las restantes condiciones a la norma DIN 1.060 de 1955.

En las pruebas en horno estático para ver la influencia del tiempo de calcinación, se encontró que para una descarbonatación total, el material no debe permanecer menos de 15 minutos a los 950 - 1.000°C. Como esta variable esta influida por el tiro del horno y el movimiento del material, estas pruebas se completaron en nuestro horno piloto rotativo (5x0,4 m), encontrándose que en todo caso el tiempo de percolación por la zona de máxima temperatura, no debe ser menor de los 15 minutos indicados (a 950 - 1.000°C).

Finalmente, como para la planta industrial se pensaba emplear un horno rotativo (MIAG), se hicieron también en nuestra Planta Piloto las pruebas necesarias para determinar las condiciones de producción óptimas con este tipo de horno. La mayor parte de estas pruebas fueron programadas y hechas por el Dr. Albrecht Bake M., de la firma SOPROCAL. Se estudiaron, además de la influencia del tiempo de paso del material, la atmósfera, tiro de aire y economía de combustible, y se comprobó la mejor calidad de la cal obtenida a temperatura baja.

#### HYDRAULIC LIMES BASED ON POZZOLANIC COMPONENTS

##### SUMMARY:

*It would be very convenient to be able to produce hydraulic lime out of most types of limestone. In this connection pozzolanic lime could be considered as a quite interesting possibility. In this paper the set of conditions that make limestone suitable for hydraulic lime manufacturing are indicated and some essential conditions of pozzolanic lime formation are discussed.*

*As an example of the theories discussed, the case is analyzed of a limestone that was not considered suitable to produce hydraulic lime; yet, studies that were made at IDIEM, including tests at pilot plant level, showed it fit for the production of a good quality pozzolanic lime.*

*This kind of lime has been industrially produced at the new SOPROCAL mill in Melipilla since one and a half years ago.*

