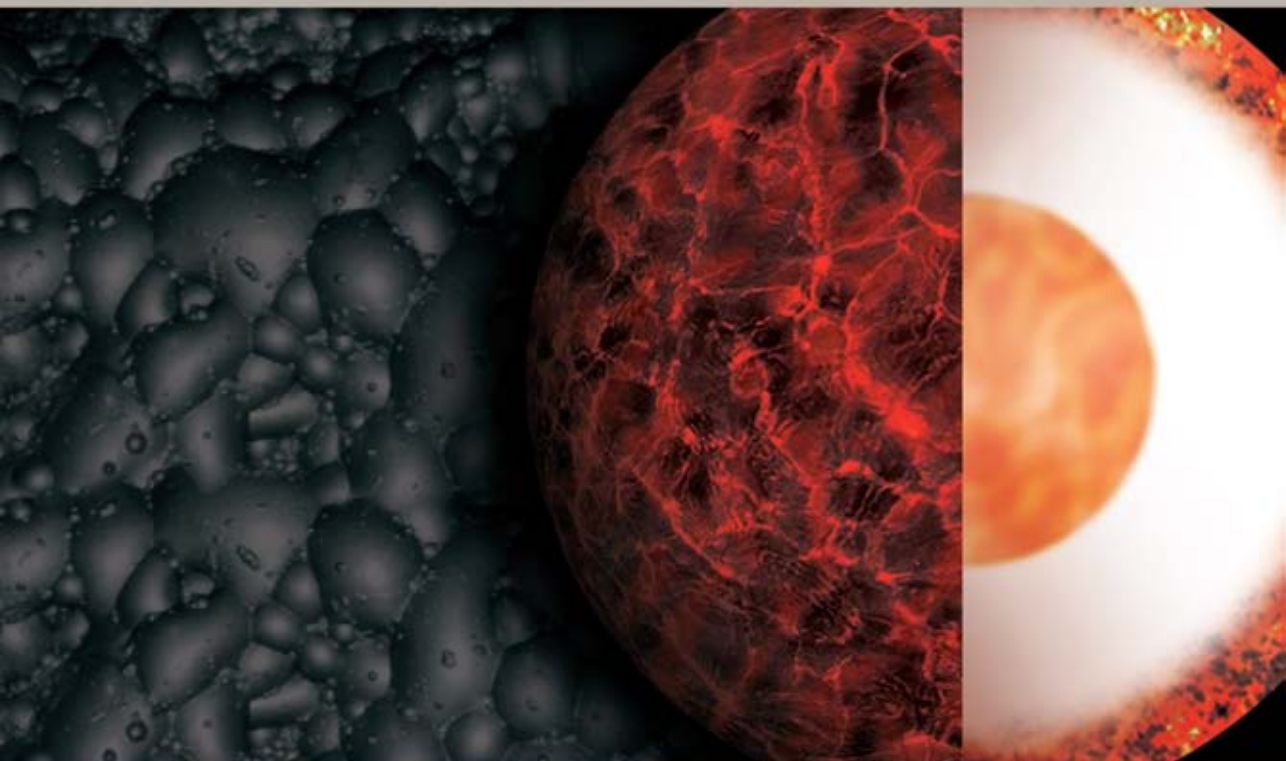


# LA CAL

¡ES UN REACTIVO QUÍMICO!



GUILLERMO COLOMA ÁLVAREZ

# **LA CAL: ¡ES UN REACTIVO QUÍMICO!**

**Guillermo Coloma Álvarez**

**Guillermo Coloma Álvarez**

Registro de Propiedad Intelectual, **Inscripción N° 170504**

**I.S.B.N. N° 978 - 956 - 319 - 225 - 4**

**Primera edición, julio 2008**

1.000 ejemplares

Prohibida su reproducción por cualquier medio, fotocopias, escaneo, digital, etc.

**Diseño Portada: Puerto Diseño**

(Corte de partícula esférica de cal, que muestra los tres componentes que se generan en la cal al calcinar la materia prima)

Impreso en Chile.

**PATROCINIO**

**Canadian Institute of Mining,  
Metallurgy and Petroleum  
Rama Los Andes  
(CIM Los Andes) A.G.**



**Instituto de Ingenieros de  
Minas de Chile**



## **AGRADECIMIENTOS**

A María Cristina y Cristina Paola por comprender mis inquietudes, entregando generosa y pacientemente horas de su tiempo, tranquilidad y libertad para utilizarlo en abordar esta tarea.

A Carlos Tarragó Cardonne, por su fuerte apoyo, su constante empuje, control y exigencia para alcanzar el cumplimiento de esta meta personal.

A Genaro Godoy, por su ayuda en términos técnicos de algunas partes y piezas de hornos de cal.

A Jaime Reyes, por su entusiasmo, alegría y compromiso que puso a disposición de este libro junto a su equipo de Marketing y publicidad.

A Karin Marcus por su dedicación y diligencia en la coordinación para el diseño de figuras, compaginación y edición.

A todos los que participaron en la decisión de entregar recursos para que pudiera editarse.

A mis amigos Reinaldo Mendoza; Jorge Menacho y Yadranka, por aceptar sin contratiempo el compromiso de entregar su valioso aporte realizando la presentación, revisión y el prólogo de éste.

Al Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo (CIM) y al Instituto de Ingenieros de Minas de Chile (IIMCH) por haber apoyado el patrocinio a esta obra.

A usted por tenerlo en sus manos y haberse dado el tiempo de leer esta página.

A todos: muchas, muchísimas, gracias.

**Guillermo Coloma Álvarez**



## PRÓLOGO

La Cal: ¡Es un Reactivo Químico! Esta sugerente afirmación queda extraordinariamente demostrada a través de las páginas de este completo documento, escrito por un conocido y experimentado especialista, don Guillermo Coloma Álvarez. Tal vez la afirmación inicial sólo yace en el subconsciente de la mayoría, porque desde tiempos inmemoriales la cal está tan arraigada en la actividad humana, que ya es parte de nuestro entorno natural, quitándonos la capacidad de asombro de sus extraordinarias habilidades.

Guillermo Coloma Álvarez, Químico de la Universidad Técnica del Estado de la generación de 1977, desde sus inicios formó parte del staff de INACESA S.A., llegando a través de los años a transformarse en un verdadero símbolo de dicha importante empresa. Muy visionario, ya en los años ochenta se dio cuenta de las necesidades futuras de la cal y de la carencia de libros de divulgación del conocimiento en este tema, en especial en idioma español. Por ello, en el año 1991 escribió junto a otros colegas, su primer libro: “La Cal en el Beneficio de los Minerales”, de gran éxito en la comunidad minera y en el ámbito académico, a nivel nacional e internacional. En 1995 escribió un segundo libro, titulado esta vez “La Cal en la Metalurgia Extractiva” y en el año 2002, publicó un CD interactivo denominado “La Cal en Procesos Metalúrgicos y de Medio Ambiente”.

Guillermo Coloma visualizó tempranamente el crecimiento de las aplicaciones de la cal no sólo en Minería, sino también en muchos otros procesos industriales, todos ellos cruzados horizontalmente por las restricciones ambientales que sin dudas, seguirán siendo crecientes al menos en los próximos 20 años, dejando espacio y un desafío a Guillermo, para que su próximo libro lo dedique exclusivamente al tema del medio ambiente.

El presente libro, “La Cal: ¡Es un Reactivo Químico!” es un aporte valioso al conocimiento de la cal y a sus usos actuales y potenciales, no sólo orientado a las aplicaciones conocidas y de necesidades previsibles, sino además por su visión de aplicaciones hoy inexistentes. Esto último escapa del estilo estrictamente académico, ya que se supone que un libro técnico-científico debe contener hechos establecidos y respaldados ciento por ciento, excluyendo ideas que aún están en desarrollo. Pero justamente este estilo de escribir, es lo que enriquece enormemente el libro, ya que abre puertas ocultas o difusas y comparte sus ideas, para ser tomadas por terceros y llevarlas tal vez a puertos desconocidos, pero útiles para el quehacer humano.

A lo anterior se debe agregar el estilo coloquial con que escribe Guillermo, buscando la simplicidad de los conceptos para hacer entender temas que muchas veces son complejos. De igual forma, es muy destacable el modo recursivo de su prosa, esto es, aspectos relevantes son comentados de modo recurrente en varias partes del texto, asegurando así una comprensión de los conceptos más relevantes. Ello hace recordar a los buenos maestros, que siempre vuelven a los conceptos y enseñanzas fundamentales para asegurarse que sus discípulos efectivamente aprendan y los sigan.

A través de 20 capítulos, Guillermo nos pone al día en el tema de la cal. Luego de una amena introducción, nos entrega una reseña histórica al mejor estilo del gran Fathi Habashi. A continuación nos lleva de la mano por las diferentes opciones de fabricación de la cal, su clasificación y las impurezas, para luego en el capítulo 6, zambullirse en una completa descripción de los tipos de cal.

Los 2 capítulos siguientes están dedicados a la caracterización físico-química de la cal y a su estabilidad en el tiempo. Enseguida Guillermo hace un viraje en los capítulos 9 y 10, hacia aspectos más aplicados, como son el manejo y almacenamiento de la cal y aplicaciones para diversos procesos. En los capítulos 11 y 12 discute los factores que caracterizan el proceso de apagado y el control de su eficiencia, mientras que los capítulos 13 y 14 los dedica al transporte hidráulico de lechada y al importante tema de las incrustaciones. En los 2 capítulos siguientes, Guillermo aborda el tema de los alcalinizantes alternativos y de la medición del pH, mientras que en los 4 capítulos finales, se introduce en la arista del mercado, discutiendo estadísticas de producción nacional de cal, los usos industriales, el consumo de cal en nuestro país y las empresas mineras usuarias de cal, que por lo demás copan cerca del 80% del mercado nacional de la cal.

Este completo texto entrega en su parte final, 3 anexos con información relevante en temas de seguridad, caracterización analítica y aspectos legales. Guillermo cierra su libro con una bibliografía, donde el lector pueda complementar o profundizar algunos temas de su interés.

Lo único que puedo agregar, son mis sinceras felicitaciones a Guillermo Coloma Álvarez y a INACESA S.A., por compartir de modo tan abierto el conocimiento y know how acumulados por tantos años y tantas “batallas” para implantar nuevas soluciones en los procesos productivos industriales, muchas veces reñidos con el medio ambiente, donde la cal ha sido, es y será el interlocutor que armoniza la relación Hombre-Medio Ambiente, hoy muy relevante y a futuro aún más.

Dr. Jorge M. Menacho  
Gerente Técnico  
De Re Metallica Ingeniería Ltda.



## PRESENTACIÓN

Corría el año 1987 fecha en que llegó a la planta, de cianuración de plata, donde yo era Administrador, Guillermo Coloma Alvarez a ofrecer cal la que utilizábamos en la planta, para alcalinizar las soluciones con cianuro. Él por esos años se iniciaba recién en el caminar por el mundo de las faenas mineras.

Conversamos algunas horas, y según lo recuerda él yo le habría dicho que se iba a encontrar con que los clientes con los cuales el tendría que interactuar, conocían bastante de cal y que por lo tanto el tendría que convertirse en una autoridad en ese campo.

He seguido de bastante cerca la trayectoria de Guillermo y no me cabe ninguna duda que se ha convertido en uno de los especialistas en cal más connotados del país.

Han pasado casi tres décadas de ese entonces, 27 años, y el “ingeniero Coloma” me solicitó que hiciera la presentación de un nuevo libro que ya estaba terminando.

He leído su libro: LA CAL ¡ES UN REACTIVO QUÍMICO! y en él, el autor ha plasmado sus conocimientos prácticos y teóricos que ha adquirido en su trabajo en el campo de la cal durante su prolongada trayectoria.

El libro abarca desde una reseña histórica hasta los usos de la cal, pasando por conceptos, con bastante profundidad, químicos, fisicoquímicos, hidráulicos, para terminar entregándonos estadísticas de consumos y producción actuales y las proyecciones de ella en el futuro.

Es interesante conocer, y se dan cifras muy detalladas en el libro, que la producción anual de cal es cercana a los tres millones de toneladas y que el 95 % de ella se utiliza en la industria minera y celulosa.

En general los conceptos están planteados con la profundidad necesaria y con claridad meridiana y este libro debería constituirse en una valiosa herramienta de consulta y de apoyo, para los profesionales que utilizan este reactivo ya sea en los procesos hidrometalúrgicos, de concentración de minerales, en la neutralización de efluentes, en la minería no metálica, etc.

El autor en este libro le da un enfoque distinto a los anteriores y trata de mostrar que la cal es un reactivo químico y expone a través del libro como el CaO se puede aprovechar cuando se convierte en hidróxidos al reaccionar con el agua y de qué forma se puede utilizar el ion calcio producto de la reacción antes mencionada.

En el capítulo del efecto depresor de la cal en la pirita, muestra como la cantidad de ion calcio absorbido tiende a aumentar apreciablemente en la zona de pH donde se manifiesta la acción depresora.

Estoy cierto que este libro será de gran aporte para la minería metálica y no metálica en el país y en el extranjero.

Felicito a mi amigo, Analista Químico y Diplomado en Metalurgia Extractiva, Guillermo Coloma Alvarez por haber aceptado el desafío de hace casi 3 décadas y haberse convertido hoy en un referente internacional en área de la cal y el libro LA CAL ¡ES UN REACTIVO QUÍMICO! demuestra lo anterior, además estoy cierto de que se convertirá en manual de consulta permanente en la minería metálica y no metálica.

Reinaldo Mendoza Videla  
RMV Ingehidromet Limitada  
Ingeniero Civil de Minas U de Chile  
Consultor Internacional

Antofagasta, Mayo de 2008

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>20</b>
<b>2.</b>	<b>RESEÑA HISTÓRICA</b>	<b>26</b>
<b>3.</b>	<b>FABRICACIÓN DE CAL</b>	<b>31</b>
3.1	Generalidades	
3.2	Materias primas	
<b>4.</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>41</b>
4.1	Dolomita	
4.2	Magnesita	
4.3	Calcita	
<b>5.</b>	<b>IMPUREZAS</b>	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b>TIPOS DE CAL</b>	<b>62</b>
6.1	Cal Viva	
6.1.1	Solubilidad de la cal calcítica en agua.	
6.1.2	Componentes alcalinizantes de la cal	
6.1.3	Factores que afectan la calidad del CaO industrial	
6.1.3.1	Composición química de la caliza, $\text{CaCO}_3$ más impurezas	
6.1.3.2	Temperatura del horno	
6.1.3.3	Tiempo de residencia	
6.1.3.4	Atmósfera del horno	
6.2	Cal Apagada o Hidratada	
6.2.1	Cal apagada de alto calcio	
6.2.2	Cal apagada dolomítica normal	
6.2.3	Cal apagada dolomítica especial	

6.3	Cal Apagada Hidráulica	
6.4	Cal Aérea	
6.5	Cal Refractaria	
6.6	Otras Denominaciones	
<b>7.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LA CAL</b>	<b>76</b>
<b>8.</b>	<b>ESTABILIDAD DE LA CAL EN EL TIEMPO</b>	<b>81</b>
<b>9.</b>	<b>MANEJO Y ALMACENAMIENTO</b>	<b>84</b>
9.1	Disposiciones Legales	
9.2	Peligros y Riesgos para la Salud	
9.3	Toxicidad	
9.4	Protección	
9.5	Higiene	
9.6	Almacenamiento	
9.7	Derrames	
9.8	Hoja de Seguridad de la Cal	
<b>10.</b>	<b>APLICACIONES DE LA CAL PARA DIVERSOS PROCESOS</b>	<b>88</b>
10.1	Cal Viva	
10.2	Cal Apagada o Hidratada	
10.3	Lechada de Cal	
10.3.1	Apreciación general del apagado de la cal y factores que afectan el proceso de preparación de lechada de cal	
10.3.2	Cal industrial y proceso de hidratación o apagado de la cal	
10.3.3	Equipos que son utilizados para el proceso de preparación de lechada de cal	
10.3.3.1	Apagadores cerrados para pulpa	

10.3.3.2 Apagadores para pasta

10.3.3.3 Apagadores en molino de bolas

10.3.3.3.1 Descripción de preparación de lechada de cal en  
molino de torre o “Vertimill”

<b>11.</b>	<b>FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE APAGADO</b>	<b>99</b>
<b>12.</b>	<b>FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DEL APAGADO</b>	<b>100</b>
12.1	Tipo de Caliza Usada en la Calcinación	
12.2	Proceso de Calcinación para Fabricar CaO	
12.3	Temperatura de Hidratación	
12.4	Razón o Proporción Agua Cal	
12.5	Grado de Agitación Durante la Hidratación	
12.6	Viscosidad de la Pulpa o Suspensión	
12.7	Tiempo de Hidratación	
12.8	Composición de la Calidad del Agua	
12.9	Temperatura del Agua	
12.10	Apagado o Hidratación Aérea	
<b>13.</b>	<b>TRANSPORTE HIDRÁULICO DE LA LECHADA DE CAL</b>	<b>112</b>
<b>14.</b>	<b>INCRUSTACIONES DE LECHADAS</b>	<b>124</b>
14.1	Factores que Provocan Incrustaciones	
14.2	Precauciones para Prevenir Probabilidad de Incrustaciones	
14.3	Densidad de la Lechada de Cal	
14.4	Medición de Flujo de Lechada de Cal	
<b>15.</b>	<b>ALCALINIZANTES PRODUCTORES DE GRUPOS HIDROXILOS</b>	<b>130</b>
15.1	Generalidades.	
15.2	Alcalinizantes más Comunes	

15.3	Neutralizaciones de Ácidos	
15.4	Cuadro Comparativo	
<b>16.</b>	<b>MEDICIÓN DEL pH</b>	<b>134</b>
16.1	Determinación Colorimétrica	
16.2	Determinación Electrométrica	
16.3	Control del pH	
16.3.1	Sistema de control realimentado	
16.3.2	Sistema de control prealimentado	
16.4	pH a Partir de la Cal Libre en Solución	
16.5	Cálculo del pH	
<b>17.</b>	<b>PRODUCCIÓN NACIONAL DE CAL</b>	<b>139</b>
17.1	Producción Cautiva	
17.1.1	En hornos rotatorios paralizados	
17.1.2	En hornos rotatorios funcionando	
17.1.3	En hornos verticales	
17.1.4	En hornos de solera giratoria	
17.2	Producción Privada	
17.2.1	En hornos rotatorios	
17.2.2	En hornos verticales	
<b>18.</b>	<b>USOS DE LA CAL</b>	<b>142</b>
18.1	Usos industriales	
18.1.1	Química orgánica e inorgánica	
18.1.2	Tratamiento de aguas	
18.1.3	Tratamiento de agua vía osmosis inversa	

- 18.1.4 Papel y pulpa
- 18.1.5 Alimentos y subproductos
- 18.1.6 Producción de azúcar
- 18.1.7 Petrolíferos
- 18.1.8 Centrales térmicas de generación eléctrica
  - 18.1.8.1 Eliminación del azufre (S) en el carbón:
  - 18.1.8.2 Eliminación del SO<sub>2</sub> durante la combustión:
  - 18.1.8.3 Eliminación del SO<sub>2</sub> desde los gases de combustión:
- 18.2 Aplicaciones en Construcción
  - 18.2.1 Ladrillos silícicos
  - 18.2.2 Ladrillos ligeros
  - 18.2.3 Hormigón liviano
  - 18.2.4 Morteros
  - 18.2.5 Pavimentos asfálticos
  - 18.2.6 Estabilización de suelos; y
  - 18.2.7 Revestimientos protectores
- 18.3 Aplicaciones en Agricultura
  - 18.3.1 Mejoramiento de terrenos
  - 18.3.2 Nutriente vegetal
  - 18.3.3 Abonos
  - 18.3.4 Insecticida, fungicida
- 18.4 Aplicaciones en Usos Diversos
  - 18.4.1 Pigmentos
  - 18.4.2 Barnices

- 18.4.3 Caucho-gomas
- 18.4.4 Control de contaminación
- 18.4.5 Cultivos marinos
- 18.4.6 Granjas
- 18.5 Aplicaciones en Minería Metálica
  - 18.5.1 Fundición
  - 18.5.2 En fundiciones de cobre
  - 18.5.3 En Cianuración de minerales auríferos y argentíferos
    - 18.5.3.1 Elección del alcalinizante en cianuración
    - 18.5.3.2 La cal en cianuración
      - 18.5.3.2.1 En pilas
      - 18.5.3.2.2 En Cianuración por agitación
  - 18.5.4 En Flotación alcalina
    - 18.5.4.1 Depresión de pirita
    - 18.5.4.2 Depresión con cal
    - 18.5.4.3 Relación entre flotabilidad, estructura cristalina y composición química
    - 18.5.4.4 Efecto de la oxidación sobre la flotabilidad de la pirita
    - 18.5.4.5 Agregar cal viva sólida junto al mineral en la molienda primaria
  - 18.5.5 En estabilización de ripios de lixiviación
    - 18.5.5.1 Estabilización con cal.
    - 18.5.5.2 Estabilización mecánica:
    - 18.5.5.3 Estabilización química:
- 18.6 Aplicaciones en Minería No Metálica

18.6.1 En la obtención de sales de yodos y nitratos

18.6.1.1 Alternativas de proceso para incrementar la densidad del sedimento

I.A. Neutralización con lechada de cal y recirculación de sedimento.

I.B. Neutralización modificando la preparación de lechada de cal.

I.C. Estudio morfológico de precipitado.

18.6.1.2 Diferentes alternativas de neutralización.

II.A. Neutralización con lechada de cal

II.B. Neutralización en ambiente de nitrógeno

II.C. Neutralización con ceniza de soda

II.D. Neutralización con mezclas de ceniza de soda y cal y ceniza de soda y lechada de cal en diversas proporciones.

II.E. Neutralización con carbonato de calcio.

II.F. Neutralización con carbonato de calcio y cal en diversas proporciones.

II.G. Neutralización con POREFI

18.6.2 En la obtención de colemanita sintética, en faenas productoras de ácido bórico

18.6.3 En la obtención de ulexita granulada

18.6.4 En la obtención de nitrato de potasio granulado

18.6.5 En la obtención de litio

18.6.6 En tratamiento de aguas o riles

**19. CONSUMO DE CAL EN EL PAÍS \_\_\_\_\_ 205**

**20. POTENCIALES USUARIOS DE CAL \_\_\_\_\_ 206**

<b>21. ANEXO 1</b>	207
21.1 Hoja de Datos de Seguridad de la Cal	
21.2 Plan de Contingencia Frente a Derrame	
<b>22. ANEXO 2</b>	223
22.1 Análisis químicos para determinar la calidad de la cal	
22.1.1 Determinación del CaO libre, o cal libre. Norma ASTM C 25-06	
22.1.1.1 Fundamento	
22.1.1.2 Resumen del método	
22.1.1.3 Soluciones requeridas	
22.1.1.4 Procedimiento para cal viva	
22.1.1.5 Procedimiento para cal hidratada	
22.1.1.6 Calcular el CaO	
22.1.1.7 Calcular el $\text{Ca}(\text{OH})_2$	
22.1.1.8 Precisión y Sesgo	
22.1.2 Determinación de la cal libre en soluciones	
22.1.3 Reactividad en agua	
<b>23. ANEXO N° 3</b>	232
23.1 DECRETO N° 90 / - 30 de Mayo 2000: Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales Publicado Diario Oficial: 7 Marzo 2001	
<b>24. BIBLIOGRAFÍA</b>	254



## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando en 1990 un par de amigos y colegas nos propusimos editar un libro referido a la cal, fue porque en aquella época no había literatura en español referida al reactivo y en la zona norte de Chile, específicamente en las cuatro primeras regiones, se vislumbraba un crecimiento minero-metalúrgico importante, donde el uso de la cal sería imprescindible para que los procesos funcionaran eficientemente.

En la región de Antofagasta, se desarrollaba el principal proyecto minero, Escondida, el cual para obtener su cobre, aplicaría el proceso de flotación convencional, por lo que necesitaría de cal para dicha aplicación. Del mismo modo las faenas de oro se encontraban en pleno apogeo. En la región de Arica y Parinacota estaban en operación, entre otras, Vilacollo y Fabián. En la región de Iquique estaba Challacollo, Flomax en la región de Antofagasta y en plena construcción estaban Inversiones Mineras El Inca y Amax Guanaco; mientras que en la región de Atacama, funcionaban Mantos de Oro, Tres Cruces y El Hueso, entre otras.

Era entonces el renacer del procesamiento de los minerales auríferos y argentíferos en la zona norte, los cuales en el proceso de cianuración por agitación o en pilas, utilizaban cemento como aglomerante e hidróxido de sodio como alcalinizante, por lo que eran potenciales consumidores de cal.

Quisimos ser partícipes de esta historia minero-metalúrgica mediante la edición de un texto que abordaría la cal y su uso en los distintos procesos de extracción de cobre, oro y plata. Es así que en 1991 se editó el libro “La Cal en el Beneficio de los Minerales”, primera edición, en el cual abordamos tres capítulos: Generalidades de la Cal; La Cal en la Flotación de los Minerales; y La Cal en el Proceso de Cianuración. Los libros los distribuimos gratuitamente, a las bibliotecas de las Universidades del país, que entregaban la especialidad de Química; Minas; y/o Metalurgia, como también a un importante universo de profesionales insertos en la minería. Asimismo académicos y estudiantes de nuestro país, de países vecinos nos solicitaron ejemplares, entre ellos: Perú, Alemania y Canadá.

El éxito alcanzado con la primera edición, nos hizo publicar la segunda edición del mismo el año 1993, pero el hecho de que aparecía otro mercado para la cal relacionado con el medio ambiente, decidimos en 1995, realizar el texto: “La Cal en la Metalurgia Extractiva”. En él mantuvimos y mejoramos los tres capítulos del libro anterior e incorporamos a dos profesionales más para desarrollar un cuarto capítulo referido a La Cal en los Procesos Pirometalúrgicos, donde no dejamos de abordar el uso del reactivo en la descontaminación ambiental. Editamos 2000 ejemplares, que también fueron distribuidos gratuitamente del mismo modo que el anterior.

En el 2002, la tecnología era digital, por lo que no nos quisimos quedar atrás y publicamos un

CD interactivo relacionado con la cal, el que denominamos “La Cal en Procesos Metalúrgicos y de Medio Ambiente”. Al igual que los libros anteriores, también fue entregado libre de costo a quienes estaban relacionados con el tema, fueron 2000 discos compactos, en los cuales presentamos como novedad algunas simulaciones con las que se pueden realizar cálculos en forma muy fácil, sin mayores conocimientos en el tema, con sólo colocar los datos en las celdas que la simulación dispone para ello y hacer internamente el cálculo entregando un resultado. Fue muy interesante para la época, útil para los operadores, pero nos dimos cuenta de que no era un buen elemento de enseñanza, dado que las personas se privan de razonar y se mecanizaban.

Entre nuestras publicaciones, tuvimos una grata sorpresa porque en 1998, en Inglaterra, aparece un nuevo libro referido a las calizas y cales, “Limes and Limestone. Chemistry and Technology, Production and Uses” escrito por J.A. H. Oates, quien en el Anexo 2 de las referencias generales hace mención a nuestros dos libros anteriores.

El consumo de cal, en las empresas que adquirían el producto a terceros, en la zona norte de Chile, durante el período, 1990-2005, fue muy particular, éste se inició mayoritariamente en la región de Atacama, en 1990 esta región consumía 44.000 toneladas, de las 76.000 que requería dicho mercado, quedando las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, con las 32.000 restante. Al año siguiente, 1991, fecha en que publicamos el primer libro, en la región de Atacama el consumo de cal alcanzaba a las 31.000 toneladas del mercado total de 72.000 toneladas de estas 4 regiones, o sea prácticamente se había invertido la situación. Sin embargo, cuatro años después, en 1995, nuevamente se había revertido el consumo, éste había crecido a 154.000 toneladas y la región de Atacama adquiría 90.000 toneladas, las que principalmente fueron incrementadas por faenas como Codelco El Salvador, que cerró sus operaciones de fabricación de cal porque era más conveniente adquirirla a terceros. Aparecía con un fuerte crecimiento La Coipa, comenzaban nuevas operaciones, entre otros, El Hueso, Candelaria, en fin una serie de nuevas empresas mineras que requerían de la cal.

El cambio brusco que presentó el consumo de cal a favor de una u otra región, se dio principalmente por dos hechos.

Uno: el mercado minero, específicamente de cobre, fue concentrándose en las tres primeras regiones.

En Antofagasta, como ejemplo, tenemos el crecimiento de Escondida, la minera privada más grande del mundo:

El año 1990 procesaba 35.000 toneladas de mineral por día, para producir 320.000 toneladas anuales de cobre contenido en concentrados.

Cinco años después, en 1995, el flujo de mineral que procesaba alcanzaba las 54.600 toneladas por día y producía 467.000 toneladas de cobre fino en concentrado, y desarrollaba su primera planta para producir cátodos de cobre por medio de lixiviación amoniaca, en la que no pudieron obtener los resultados que esperaban, por lo que el año 1998 decidieron cerrarla e iniciar las operaciones de la planta de óxidos.

El año 2000, su nivel de procesamiento de mineral para producir concentrado alcanzaba las 120.000 toneladas por día, su producción era de 917.000 toneladas de cobre fino de las cuales 792.000 correspondían a concentrados.

El 2005 su nivel de procesamiento era de 230.000 toneladas de mineral por día, su producción de cobre fino de 1.272.000 toneladas, de las cuales 1.122.000 correspondían a concentrados. En esta misma fecha se inicia la alimentación de un nuevo tipo de mineral del yacimiento Escondida Norte, y recientemente ha entrado en operación la planta para lixiviar mineral sulfurado de baja ley, donde esperan producir 180.000 toneladas de cátodos con lo que alcanzarán una producción total de cobre fino de 1.500.000 t/año.

Dos: la composición mineralógica del mineral que la mina envía a planta. La mina para elegir el método de explotación por un lado debe cumplir los límites económicos y ambientales de explotación, que están relacionados con el tipo de mineral; la ubicación; el tamaño; la forma; la topografía superficial; la profundidad del cuerpo mineralizado; la complejidad, calidad y distribución de la mineralización; las características del macizo rocoso, y otras. Por otro, debe velar por los límites económicos de la explotación total de la mina, donde generalmente se utiliza el método de la relación estéril/mineral vs. ley media, definiendo la ley de corte crítica, que corresponde a no tener beneficio alguno al extraer la última expansión marginal. A esto debe agregar las combinaciones necesarias de los distintos minerales para no afectar el buen funcionamiento de la planta de beneficio, sea ésta concentración colectiva o selectiva o cianuración en pilas o por agitación.

Los dos hechos anteriores, son las principales causas que generan cambios bruscos de consumo de cal entre un período y otro.

En este período de 15 años, el crecimiento de plantas procesadoras de minerales sulfurados de cobre no sólo se fue dando por la instalación de nuevas concentradoras, sino que también hubo ampliaciones de otras.

Para analizar el caso de las nuevas concentradoras, se puede mencionar que el año 1990, habían cinco en la zona norte: Escondida, Mantos Blancos, Michilla y Codelco, en esta última habían dos: El Salvador y Chuquicamata.

El año 1995 inició operaciones en Copiapó la concentradora de Candelaria y en la región de Coquimbo la pequeña Planta Chacay de Los Pelambres, con 5.000 toneladas de mineral por día.

El año 2000, a todo lo anterior se adicionaba en la región de Tarapacá las operaciones de Collahuasi y en la región de Antofagasta estaba instalada la concentradora de Zaldívar, más la concentradora de cobre a partir de escorias de la fundición de Altonorte. Mientras que, en la región de Coquimbo, Los Pelambres detenía la planta Chacay e iniciaba operaciones la nueva concentradora de 115.000 toneladas por día. El 2005 no se agregó planta concentradora alguna, pero se habían ampliado la mayoría de ellas, incluida Chuquicamata de Codelco, que había pasado desde 130.000 a 180.000 toneladas de mineral por día.

Con la minería del oro y la plata pasaba algo distinto:

El año 1990 en la región de Arica y Parinacota se encontraban en plena operación Vilacollo y Fabián. En la región de Tarapacá: Challacollo. Mientras que en la región de Antofagasta estaban funcionando Flomax, Inversiones Mineras El Inca y Amax Guanaco. En la región de Atacama producían Mantos de Oro, Agua de La Falda, Minera Horus y Minera Tres Cruces.

En el lustro siguiente, en las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá habían paralizado sus faenas todas las mineras de oro y plata; en la región de Antofagasta había cerrado Flomax, en la región de Atacama, había cerrado sus instalaciones Tres Cruces, pero en la zona de Atacama y Coquimbo habían iniciado operaciones, Cancán y El Indio.

El año 2000 tanto en las regiones de Arica y Parinacota como en la región de Antofagasta todas habían dejado de producir, pero había iniciado su etapa de funcionamiento Minera Meridian.

En Atacama continuaban vigentes las mismas empresas mineras de los años 1991 a 1995, menos Tres Cruces, se agregaba Minera Maricunga. Al 2005 se había producido un cambio importante en cuanto al nivel de procesamiento de minerales de oro y plata. En la región de Antofagasta sólo quedaba Minera Meridian, en la región de Atacama sostenía sus operaciones Mantos de Oro y reiniciaba su funcionamiento Maricunga, como también se reacondicionaban los equipos en Andacollo Oro para comenzar a funcionar el 2006.

En resumen podemos mencionar que en el período de 12 años, 1995-2006, la minería del cobre ha seguido creciendo en el país, pasando de una producción de 2.510.000 t/año a una de 5.384.500 t/año, mientras que la del oro presenta una disminución de 44,6 t/año a 42,1 t/año y la plata un aumento, pasando de 1.041 t/año a 1.607 t/año.

Estas características tan especiales de la minería, en el fondo, son las que nos complican para realizar las proyecciones de los consumos de cal en este rubro.

Cabe mencionar que por causa del mejoramiento del precio internacional del cobre y de otros metales, la importancia de la actividad minera ha crecido fuertemente en Chile. Considerando los precios del año 2006, la minería contribuyó con el 23% del PIB, la que comparada, en el mismo año, con otros rubros, tales como: los servicios financieros con 13,2% y las industrias con 12,8%. La minería ha pasado a ser la actividad económica más relevante del país, lo que también se refleja en otros aspectos como es la importancia que reviste en materia de exportaciones y financiamiento fiscal.

Por otro lado, el aumento del precio de los productos mineros ha contribuido también a un crecimiento del ingreso nacional muy superior a lo factible con el crecimiento del producto interno bruto, PIB. A modo de ejemplo, entre el 2003 y el 2006, el PIB creció un 16,5%, mientras que el ingreso nacional fue de 26,5%, por ello, la minería es una actividad que genera oportunidades en todo sentido, la debemos aprovechar en su totalidad, esto es, adquirir mayores conocimientos y comenzar con la exportación de lo aprendido en minería y metalurgia.

El crecimiento del consumo de la cal, ha sido significativo, debido principalmente al uso en la producción de concentrados de cobre por flotación y en la producción de oro y plata por cianuración, el crecimiento de éste no ha sido menor, ya que cuando en 1995 el acumulado del periodo (1987 a 1995) era de 540.000 toneladas de cal, con un promedio de 77.000 t/año, en el lustro siguiente (1996 a 2000) llegó a ser de 985.000 toneladas, con promedio anual de 200.000 t/año y del 2001 al 2005 subió a la no despreciable cifra de 1.500.000 toneladas, con un promedio de 300.000 t/año, un crecimiento vertiginoso que no se aprecia detenimiento en el corto plazo (2010-2015)

Estimamos prudente, frente al crecimiento y la estabilidad que se visualiza en el consumo de cal, ser partícipes de esta historia entregando información escrita, en duro, de la cal, el tiempo nos avala la importancia que tuvo, tiene y tendrá este reactivo en la industria minera chilena, ya que su fuerte incremento de consumo seguirá el mismo ritmo del crecimiento minero en Chile y de las exigencias medioambientales que en forma incipiente comienzan a surgir.

En nuestro primer libro, aunque mencionamos que la cal era un reactivo químico no ahondamos en argumentos para demostrarlo. Ahora, en la medida que avancemos en el tema, se podrán dar cuenta de que actualmente la cal ya ha dejado de ser el material o insumo para la minería, es más bien, o se ha ido convirtiendo en lo que siempre debió haber sido, un reactivo químico, cuya fórmula química es óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), por lo que podemos aprovechar las ventajas individuales que nos entrega tanto el óxido al convertirse

en hidróxido, al hidratarse con agua, como la que nos entrega el elemento calcio al quedar en estado iónico, por la cantidad de agua agregada, de esta manera estamos seguro de que lograremos evitar las confusiones que actualmente ocurren en diversos ámbitos de denominar equivocadamente a la piedra caliza, o sea al carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$  como cal, siendo éste en realidad el óxido de calcio,  $\text{CaO}$ .

Todo lo anterior hizo surgir la idea de entregar una recopilación de antecedentes a través de un nuevo texto, donde además de señalar las características generales de la cal, se aborde con mayor profundidad la forma en que se aplica en los procesos minero metalúrgicos actuales.

Esta vez no vamos a incluir los temas referidos a procesamiento de minerales ya descritos en las publicaciones anteriores, sino que este texto se concentrará en todo lo relacionado con la cal, con el fin de entregar herramientas específicas que ayuden a solucionar, minimizar o eliminar, los problemas que presenta tanto en el transporte, manipulación, bodegaje de la cal viva calcítica. También se aborda la forma adecuada de utilización o aplicación de la cal, en cuanto a: preparación de lechadas, transporte hidráulico de cal sólida y temas similares de gran utilidad para quienes conviven diariamente con el producto, todo ello con el propósito de transformar este libro en una fuente de aprendizaje y capacitación, tanto para el personal involucrado con este reactivo, como para los supervisores que tienen la responsabilidad de educar a sus colaboradores.

Por intermedio de este libro conocerán la historia de la cal, la fabricación del reactivo, la clasificación tanto de las materias primas como de los productos, los tipos, las características físico químicas, la estabilidad, el manejo y almacenamiento, las aplicaciones en diversos procesos, los factores que afectan la eficiencia de apagado o hidratado, el transporte hidráulico de sólidos en las lechadas, las incrustaciones, los distintos alcanilizantes generadores de iones  $\text{OH}^-$ , la medición del pH, la producción nacional de cal y sus diversos usos, consumo actual y futuro, proyectos mineros que consumirán cal, para finalizar con un anexo dedicado al control de calidad del reactivo, la hoja de seguridad de éste y el decreto N° 90 de la Presidencia de la República, del 30 de mayo del 2000, que establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, que al igual que el decreto que normó la emisiones de gases al ambiente, genera opciones de mayor consumo potencial de cal, para poder extraer los elementos iónicos que contienen estas descargas líquidas, sean estos metales o aniones que afectan al medioambiente.

## 2. RESEÑA HISTÓRICA

La palabra cal deriva del latín calx calcis, y de ella han surgido términos como caliza, calcinar, calcáreo y otros. En idioma inglés la cal es lime, mientras que su principal materia prima, la caliza es limestone, es decir, la piedra caliza.

Este producto es uno de los más antiguos conocidos por la humanidad.

Hasta antes del rápido crecimiento de la minería y la industria química en el siglo 20, el óxido de calcio (cal) fue utilizado casi en su totalidad como un material para la agricultura y la construcción.

Por el lado de la construcción, donde hay pocos y confusos datos, según algunos autores, la cal más impurezas era aplicada en suelos, muros y en pinturas, en la época Neolítica y en la cultura de Jericó, 6.000 a 7.000 años Antes de Cristo, que son dos de las más antiguas culturas urbanas neolíticas, donde aparecen vestigios del uso de la cal.

En Anatolia, actual Turquía, específicamente en Catal Hüyük, en la obra “Earl Est Civilizations of the Near East” de James Mellaart, aparece que las viviendas de la ciudad estaban provistas de dos niveles, el más bajo de los dos estaba provisto de pilares de madera recubiertos con una mezcla de cal y pintados de rojo, del mismo modo se trataba el piso, mientras que las paredes se cubrían de fresco (pinturas hechas en mortero fresco, antes de endurecer) con dibujos esquemáticos de animales, ciudades y volcanes de fondo.

En la cultura de Jericó, se han encontrado evidencias de la utilización de la cal en cisternas que se han descubierto. Edward Bacon cita suelos de morteros de cal en casas excavadas por arqueólogos rusos en Djeitun (Turkmenistan), al oeste del mar Caspio, pertenecientes a culturas del tercer y cuarto milenio A. de C.

En la cultura Mesopotámica, 2500 años A. de C. apareció el primer horno de cal y ésta comienza a ser mezclada con arena para ser utilizada como revestimiento en la construcción, ejemplo de ella es el Palacio Asirio de Til Barsib (Tel Ahmar) del siglo XVIII A. de C. con el fresco que desarrolla una audiencia del Rey Figlatpileser III con un friso de escribas, sirvientes y prisioneros. Las pinturas murales de Mari, siglo XVIII A. de C., en Louvre, fueron pintadas sobre capa de yeso al temple. En la ciudad de Caldea Ur, patria de Abraham, C.L. Woolley dice que el revoque de las paredes se hacía con cal.

A través del tiempo se fue perfeccionando la técnica y es así como el estuco -mortero- de hidróxido de calcio (cal apagada) fue usado en Creta a comienzos del año 1500 A. de C.

En los años 1500 A. de C. a través de la cultura griega, los europeos, la comienzan a utilizar con tierras de Santorin aplicadas en revestimientos de interiores y suelos, siendo el Palacio

de Tirinto uno donde se utilizó de esta manera. En Thera se introdujo la mezcla cal - arena y el polvo volcánico de la tierra de Santorin explotada en la Isla, obteniendo así morteros estables al agua y cuyas propiedades tienen una cierta analogía con los morteros modernos a base de aglomerantes hidráulicos. Esta forma de actuar era conocida fuera de la isla, ya que se han encontrado estatuas que adornaban el “Hephaisteion” de Atenas que contenían “Tierra de Santorín”

En muchas de las pinturas al fresco se utilizó cal, si no era en la misma fabricación de la pintura, lo era en la preparación de las paredes, tal como se aprecia en las tumbas de Tebas del siglo XV A. de C., en la época de Tutmosis III, en los palacios de la época como el de Cnosos. Del mismo modo, se utilizó en la casa de Cadmos en Tebas y en algunos fragmentos del palacio de Tirinto de hace 1400 años A. de C.

En Europa las cerámicas incisas de épocas del campaniforme español, en los años 2000 a 1500 A. de C. usaban cal, al igual que las cerámicas de La Tène, algo así como 450 años A. de C. y las de Auvernier, donde la materia blanca y pura que rellenaba las incisiones era en algunas ocasiones de cal.

En el siglo X A. de C., se conoce el primer uso del hidróxido de calcio (cal apagada) como material de construcción (en morteros de pega o para estucos) correspondiendo éste a las Cisternas de Jerusalén bajo el período del Rey Salomón.

Theophrastos (370-285 A. de C.) un discípulo de Platón y Aristóteles, describió éste óxido en su libro “On stones”.

También el óxido de calcio (cal viva) fue usado como un reactivo químico: Xenophon en el año 350 A. de C., registró el naufragio de un barco, cerca de Marsella, que transportaba una carga de géneros (lino) y cal “para su blanqueado”.

Las figuras del ejército de terracota, de tamaño natural, que aparecieron en las excavaciones de la tumba imperial de la dinastía Qin, año 240 A. de C. fueron policromadas con cales pigmentadas.

Entre los años 200 y 100 A. de C. los romanos en Italia, la mezclaron con áridos y puzolanas, denominando el compuesto como “Opus Caementicium” que aparece en la cita Catón que describe la construcción ex calce et caementis. La fecha exacta de la introducción del mortero de cal en Roma no se conoce, pero se sabe que esta técnica fue utilizada en los dos últimos siglos de la república, en que se desarrolla y generaliza rápidamente, reemplazando los sistemas utilizados anteriormente, tales como el Opus Quadratum, gruesos bloques ajustados sin mortero, y el Opus Latericium y el Later crudus o ladrillos secos, posteriormente la mezcla de cal con áridos y puzolanas, fue utilizado masivamente en acueductos, anfiteatros, y

otros.

Vitruvio es la fuente más completa para el estudio de los componentes del mortero de cal, quien el siglo I A. de C. decía que la mezcla de los materiales se hacía en la proporción de una de cal por tres de arena o dos por cinco, según la calidad de la arena, hace mención también al empleo de otros aditivos, ya utilizados por los griegos, como ceniza volcánica, ladrillo picado, y otros.

Pliny (23 - 79 D. de C.), describió como la cal viva ( $\text{CaO}$ ) fue preparada por los griegos en la construcción del templo de Apolo, en sus apuntes indica que la mezclaron con arena, agua, tierras de Santorín y consiguieron el endurecimiento tanto en el aire como bajo agua.

Elis en el año 450 (D. de C.) menciona como la cal fue extensamente utilizada en morteros de cal.

El romano Dioscorides, en el año 75 D. de C., citó el uso médico de soluciones saturadas de agua de cal.

La cultura Maya, años 300 a 900 de nuestra era, utilizó la cal en los centros ceremoniales como Copán, Palenque; Chichénitza, y otros, estucando y tiñendo sus decoraciones que esculpían. Del mismo modo la utilizaron los Toltecas en Tula y también los Aztecas

Es en el Renacimiento en el Barroco, entre el siglo XV al XVIII, donde la cal se mezcla con marmolina y pigmentos, para ser utilizada en los estucos y decoración de la Capilla Sixtina.

La cultura Andina, específicamente en el Perú, utilizó la cal en coloraciones de frescos, que también utilizaron los españoles en la época de la colonización.

A partir del siglo XVIII se comienzan a producir aglomerantes hidráulicos, es decir, mezclas capaces de endurecer con el agua.

En la revolución industrial europea, en el siglo XVIII y XIX, se fabrican las primeras cales hidráulicas con las cuales se confeccionan morteros y hormigones.

El hidróxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , fue también utilizada por los incas y los mayas para la construcción de sus habitaciones.

Hay considerables dudas de que si los egipcios hicieron usos específicos del mortero de cal antes del periodo romano, ellos usaron el estuco de yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el cual el óxido de calcio (cal) fue probablemente una impureza.

Se puede concluir que fueron los romanos quiénes hicieron extensivo el uso del mortero de

cal apagada,  $\text{Ca(OH)}_2$ . Ellos la mezclaron con tierras de puzzuoli, encontrando un producto, de notable dureza, que les permitió mejorar su producción. Fue así como construyeron los acueductos, el puerto de Ostia, la Basílica de Constantinopla e infinidad de otras obras de arte que aún perduran. Como ejemplo de su gran conocimiento sobre el mortero, la famosa carretera Appian, la que ha perdurado por 2000 años, y que contiene cal en tres de sus cuatro capas.

La mayor estabilidad que encontraron los romanos en la mezcla de cal con tierras de puzzuoli, es debido a una reacción lenta entre la cal, la sílice coloidal y la alúmina contenidas en los productos mencionados, con formación de hidrosilicatos cuya naturaleza es comparable a la que se obtiene con la hidratación de los aglomerantes hidráulicos modernos (cementos)

Hasta el año 1720 la cal sólo era usada en construcción. De esa época, son las construcciones del hall de Massachusetts en la Universidad de Harvard y el puente de Cal y Canto en el Chile colonial.

Los conocimientos químicos de los griegos y de los romanos, no fueron suficientemente avanzados para explicar lo que sucedía durante la calcinación o cocción de la caliza.

Muchas civilizaciones antiguas se han apropiado en forma independiente del descubrimiento del óxido de calcio,  $\text{CaO}$ .

Al parecer, la cal viva (óxido de calcio) fue descubierta casualmente por el hombre primitivo cuando realizaba fogatas sobre rocas calcáreas, las que luego apagaba con agua, llegando a notar que en operaciones sucesivas, las rocas iban sufriendo cambios físicos hasta desintegrarse, (transformación a cal apagada). Luego se dio cuenta que la roca se transformaba en una pasta, que se dejaba moldear y con el tiempo se secaba adquiriendo dureza, (transformación a carbonato) lo que seguramente le permitió pegar piedras y fabricar sus medios de protección al ambiente, como pircas, chozas y otros.

Vitruvius, un ingeniero y arquitecto romano, escribió acerca de la cal durante el reinado de Augusto (27 A. C. - 14 D. C.), e hizo una observación significativa: "Cuando la caliza es sacada (retirada) del horno, no puede ser tan resistente (dura) como cuando fue introducida". También informó que la pérdida era más de 1/3 de su peso -la pérdida teórica del carbonato de calcio puro es de un 44%-. Vitruvius considero las propiedades de la cal como resultado de la pérdida de  $\text{H}_2\text{O}$  durante la operación de cocción.

La primera explicación moderna de la calcinación de la cal, fue proporcionada por el químico británico Joseph Black, quién en 1756 publicó su trabajo "Experimentos sobre magnesia alba, cal viva y otras sustancias alcalinas". Él observó que el gas obtenido por la tiza y las piedras calizas en cocción, era dióxido de carbono, el que en ese tiempo fue llamado "gas

estable”, también observó que la dureza del mortero de cal apagada, el que en la mayor parte era  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , al estar expuesto al aire, lentamente endurecía debido a que absorbía  $\text{CO}_2$  y perdía agua, Black notó que el agua de cal se enturbiaba al tomar contacto con el aire que contiene “gas estable”, con esto concluyó que el mortero endurecido, se parecía a algo similar a la piedra caliza original.

La impermeabilidad del mortero a los gases, es ilustrada por la aplicación de modernas técnicas de análisis a los morteros romanos, en los cuales en diversos casos, se ha demostrado que en el interior no se ha llegado al estado de carbonato en contraste con el exterior.

La excelente calidad de los morteros romanos ha pasado a la leyenda, se suponía que era debido a secretos de fabricación y al uso de aditivos que han sido siempre comentados en las leyendas esotéricas de las calces romanas, pero la realidad es que su buena elaboración, la perfecta calcinación de las calizas y el buen apagado o hidratado de la cal, la homogeneidad de las dosificaciones y la cuidadosa ejecución, ha sido el secreto fundamental de su realización y lo que ha permitido que conozcamos su legado tras los dos mil años que nos separan.

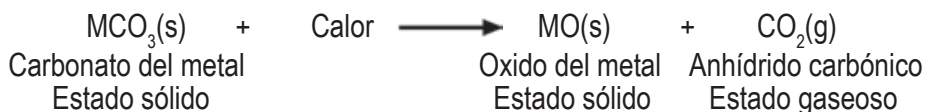
Unos de los usos más antiguos de la cal viva fue en la agricultura, como abono de cal, donde la adición de ésta a los suelos precede la era cristiana. Producciones de diversas cosechas pueden ser significativamente aumentadas por el abono de cal. Esta práctica fue comúnmente seguida en América, en la época colonial en el siglo XIX, pero a partir de comienzos de siglo XX, el uso de la cal fue declinando significativamente, debido a que en los últimos 60 años, la piedra caliza ha reemplazado el uso de cal en la agricultura por su menor costo. Solamente en tiempos recientes se ha llegado a conocer que la función del abonado de cal, es para neutralizar la acidez del suelo y suministrar el nutriente calcio, magnesio y otros elementos trazas que son esenciales para el desarrollo de los vegetales.

Universalmente, hasta el año 1900 el óxido de calcio (cal) era usado exclusivamente en construcción y agricultura. Hoy en día, más del 95% de éste, se utiliza en procesos químicos industriales y en faenas mineras, como un reactivo industrial alcalinizante, purificante de metales, absorbente, neutralizante, coagulante y acondicionante, entre otros.

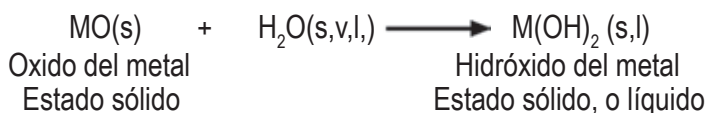
### 3. FABRICACIÓN DE CAL

#### 3.1. Generalidades

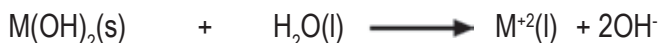
La cal es un reactivo que se obtiene por descomposición, mediante calcinación, del carbonato contenido en las calizas.



Si al óxido obtenido se le agrega agua, en cualquier estado, o se deja expuesto al medioambiente, ocurrirá:



La cantidad de agua requerida por la reacción química anterior, es la necesaria para obtener un polvo químico seco, si se agrega más agua hasta lograr la total solubilidad del hidróxido metálico, es factible lograr la disociación del catión ( $\text{M}^{+2}$ ) y los aniones ( $\text{OH}^-$ ), siendo estos últimos los que permiten medir la concentración de alcalinidad del sistema y expresarlo finalmente como pH.



Donde:

M = elemento metálico, calcio, magnesio, etc.

$\text{CO}_3$  = compuesto carbonato

$\text{OH}^-$  = compuesto hidroxilo

(s) = sólido

(g) = gas

(l) = líquido

(v) = vapor

Las calizas son rocas sedimentarias en forma de calcita, magnesita o dolomita mineral, adelante, en el punto 1.3.2, se aclaran estos términos.

Para la obtención de la cal viva, ya sea calcítica, dolomítica o magnesítica, es necesario sobrepasar la presión de disociación que ejerce el carbonato correspondiente, mediante reacción endotérmica (calcinación), para liberar el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y lograr el monóxido metálico correspondiente.

En el caso del carbonato de calcio puro ocurre la siguiente reacción química para obtener la cal viva calcítica:



La presión de disociación del carbonato de calcio, en mm. de Hg., a distintas temperaturas es la siguiente:

TEMPERATURA	PRESIÓN
[°C]	[mm Hg]
200	$7,8 \times 10^{-9}$
400	$0,3 \times 10^{-3}$
500	0,15
600	2,98
700	31,2
800	208
882	760
900	784

Si consideramos que el aire atmosférico en condiciones normales contiene 0,03 % de  $\text{CO}_2$  en volumen, entonces a una presión de 760 mm de Hg., le corresponderá una presión parcial de  $\text{CO}_2$  de 0,23 mm de Hg. Por lo tanto, mientras no se sobrepase esta presión, no ocurrirá la disociación.

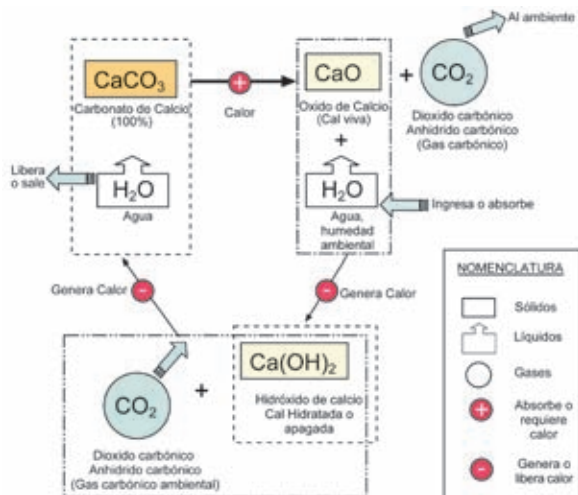
Es posible calentar el carbonato de calcio -en la atmósfera- hasta temperaturas algo mayor de  $500^\circ\text{C}$ ., sin que llegue a disociarse; se ha comprobado experimentalmente, que por sobre los  $550^\circ\text{C}$ ., éste comienza a perder  $\text{CO}_2$  y sobre los  $882^\circ\text{C}$ ., se descompone totalmente en CaO (cal viva), siempre y cuando se elimine el  $\text{CO}_2$ , el cual tiene una presión definida.

Si la presión parcial de anhídrido carbónico en la atmósfera circundante es mayor que la presión de equilibrio la reacción será:



y eventualmente el CaO puede llegar a transformarse totalmente en carbonato. Esta es la causa principal de que en la corteza terrestre sólo encontramos carbonatos.

La Figura 1 a continuación, muestra el ciclo natural de este material o compuesto:



**Figura 1: Ciclo químico natural del carbonato de calcio**

La velocidad de descomposición del carbonato de calcio a unos  $900^\circ\text{C}$ ; es muy pequeña, por lo que resulta conveniente y económico efectuar la calcinación a una temperatura entre  $1.100^\circ\text{C}$  y  $1.200^\circ\text{C}$ .

Esta calcinación, para la obtención de cal (óxido de calcio), se puede realizar en varios tipos de hornos, en Chile se realiza sólo en hornos verticales u horizontales, la elección de uno u otro depende de los factores técnicos-económicos, siendo alguno de ellos, la composición mineralógica de las materias primas en cuanto a dureza y el nivel de impurezas.

Entre los hornos verticales se encuentran de dos tipos, tal como se ilustra en la Figura 2 y Figura 3.

### A.- Los de proceso continuo:

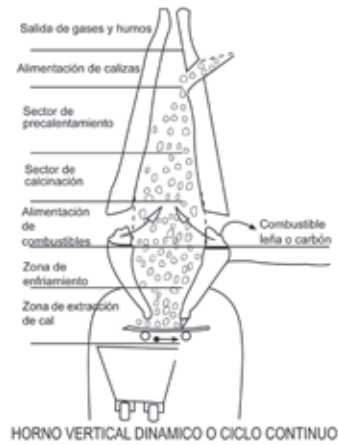


Figura 2: Horno vertical proceso continuo

### B.- Los de proceso discontinuo o por lote:



Figura 3: Horno vertical proceso batch

Entre los hornos horizontales o rotatorios se encuentra el de proceso continuo como el de la Figura 4.



**Figura 4: Horno rotatorio proceso continuo**

Los hornos rotatorios pueden ser de dos tipos: corto con precalcinador y largos sin precalcinador, tal como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5: Hornos rotatorios, proceso continuo, con y sin precalcinador.**

Se puede mencionar que todos los hornos de cal son intercambiadores de calor y transportadores, el calor debe ser transmitido desde la llama y de los gases calientes a la cama de mineral calizo que hay dentro de él. El mineral calizo debe avanzar desde la entrada a la descarga, en contracorriente a la llama, existe -según el tipo de horno- una pequeña cantidad de calor que es transmitida por radiación desde los ladrillos hacia la caliza.

En el mundo hay una variedad de hornos en funcionamiento, con las características que se indican en la Tabla 1.

Las operaciones unitarias para fabricar cal son:

**A. Mina:**

Exploración de calizas, explotación de las mismas, reducción de tamaño.

**B. Horno:**

Alimentación de caliza, separación de finos, calcinación, enfriamiento.

**C. Envasado:**

Transporte alimentación silo, descarga de éstos,

**D. Despacho:**

A granel en camión tolva o silo, o envasado en maxisacos de 1; 1,5 ó 2 t.

Tipo de Horno	Combustibles (a)	Rango de Producción (toneladas/día) TPD	Rango de alimentación de piedra caliza (mm)
<b>Eje de alimentación</b>			
Alimentación mixta	S	60-200	20-200
Doble inclinada	G,L,S	10-160	20-100
Multi cámara	G,L,S	40-225	20-150
Anular	G,L,S	80-600	10-250
Régimen de Flujo Paralelo (Standard)	G,L,S	100-600	Oct-30
Régimen de Flujo Paralelo (Cal Fina)	G,S	100-300	25-200
<b>Otros ejes</b>			
Quemador central	G,S	40-80	40-150
Cámaras externas	G,L	40-120	80-350
Quemador de rayo o emisión	G,L,S	50-800	20-175
Arco interno o sumergido	G,L,S	15-250	25-120
<b>Rotatorios</b>			
Largo	G,L,S	160-1500	polvo-60
Precalentador	G,L,S	150-1500	0-60 <sup>(b)</sup>
<b>Otros hornos calcinadores</b>			
Parrilla Movable	G,L,S	80-130	15-45
Cabezal - Formado "Top Shaped"	G,L,S	30-100	5-40
Lecho Fluidizado	G,L	30-150	0-2
Calcinador Flash	G,L	300-1500	0-2
Tierra rotatoria "Rotating hearth"	G,L,S	100-300	10-40
<sup>a</sup> G=Gaseoso, L=Líquido, S=Sólido			
<sup>b</sup> precalentador de ciclones 0-2 mm, precalentador axial 10-60 mm, precalentador de parrillas			

Tabla 1: Tipos y características de hornos en operación

El diagrama de flujo desde el punto de vista general, sin considerar mina, para la fabricación de cal lo muestra la Figura 6.

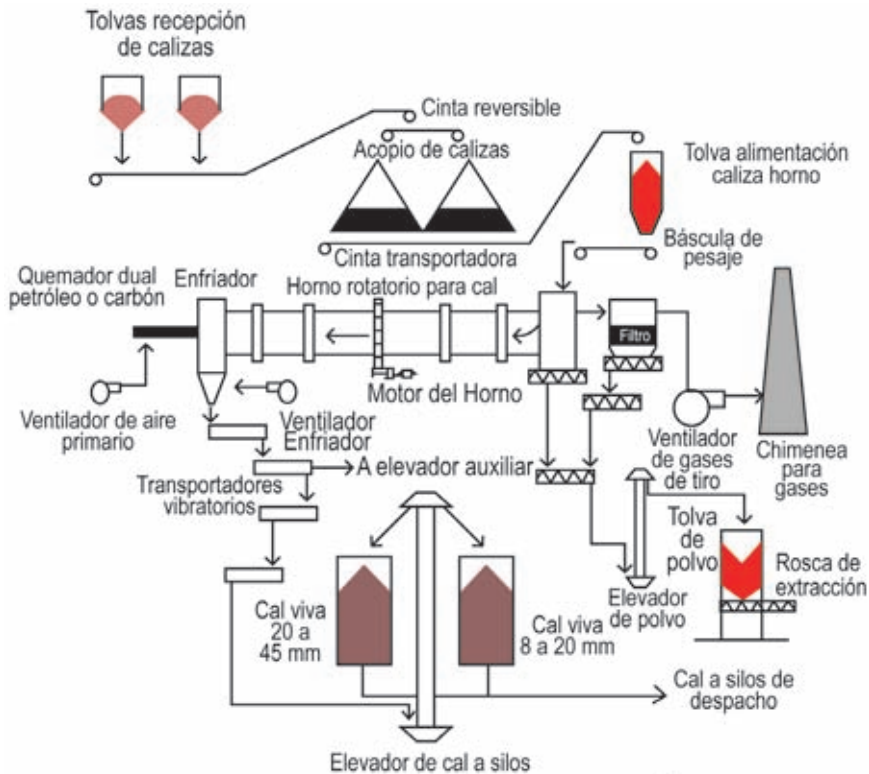


Figura 6: Diagrama de flujo para el proceso de fabricación de cal en horno rotatorio

### 3.2. Materias primas

El carbonato en las calizas aparece en rocas sedimentarias en forma de calcita, magnesita o dolomita mineral, desde donde se produce por distintos tipos de procesos.

#### Procesos químicos

En este proceso, el carbonato se obtiene por precipitación de una solución bajo condiciones adecuadas de concentración, presión y temperatura.

#### Procesos biológicos

Se obtiene a través de organismos vegetales o animales que contienen algunas células que son capaces de absorber carbonato de una solución, concentrarlo y posteriormente depositarlo en forma de esqueleto o concha. Esto normalmente es carbonato de calcio.

## Procesos clásticos

Este proceso de obtención, es por destrucción física de sedimentos calizos formados mediante procesos químicos o biológicos y que fueron redepositados en algún lugar, ya sea por congelamiento, deshielo, erosión u otro. Una vez producidos o depositados por los procesos indicados, han estado sujetos a cambios: primero se acomodaron, luego se comprimieron y compactaron bajo presión y que al ser expuestos a altas temperaturas produjo cambios en la estructura de los depósitos, ocurrió recristalización y resultó una gama de depósitos calizos, tales como los indicados en la Tabla 2.

DEPOSITOS CALIZOS	TIPOS DE MATERIAL
Calcáreos	Impuras, contienen arcilla o pizarras.
Arcillosos	Con altos contenidos de arcillas.
Carbónaceos	Que contienen material orgánica o carbón.
Estalactitas y estalagmitas	Obtenidas por precipitación química en cavernas.
Mármoles	Granos grandes que aceptan pequeños polímeros, generalmente contiene impurezas que producen su particular aspecto. Es muy pobre para cal porque crepita.
Travertinos	Densas, muy metamorfoseadas y en ocasiones impura, parecida al mármol.
Horstenos	Que contienen cristales separados de horsteno, el cual es una variedad amorfa de cuarzo (sílice).
Oolíticos	Que contienen cristales separados de horsteno, el cual es una variedad amorfa de cuarzo.
Pisolíticos	Parecidas a la olítica pero de granos mayores;
Tizas	Suaves y blancas.
Espato de Islandia	Tiene la forma más pura de carbonato de calcio, altamente cristalina, en ocasiones transparente y normalmente usada en instrumentos ópticos.
Corales y rocas coralinas	Normalmente conchas de locos, ostiones, etc.
Densas masivas	Origen biológico, frecuentemente de grano fino, siendo la principal materia prima para la fabricación de cal.

Tabla 2: Tipos y características de depósitos de caliza (Fuente: National Lime Association)

Mineralógicamente, los carbonatos útiles para la fabricación de los distintos tipos de cal son: la dolomita, la aragonita y la calcita. Siendo la aragonita, relativamente escasa, ya que es la obtenida por precipitación en caliente en un proceso químico.

Algunas características físico químicas de las calizas se muestran en la Tabla 3.

Nombre Mineralógico	Formula Química	Peso Molec.	Peso Espec.	Dureza	Forma de los cristales.
		[g/mol]	[g/cc]	[escala de Mohs]	
DOLOMITA	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	184,4	2,84	3,5-4,0	Romboédrica
ARAGONITA	$\text{CaCO}_3$	100,1	2,94	3,5-4,0	Ortorrónica
CALCITA	$\text{CaCO}_3$	100,1	2,72	3,0	Romboédrica
MAGNESITA	$\text{MgCO}_3$	84,3	3,00	3,5-4,5	Romboédrica

**Tabla 3: Características básicas de principales calizas (Fuente: National Lime Association)**

## 4. CLASIFICACIÓN

De acuerdo al compuesto mineralógico, utilizado para la fabricación del óxido metálico (cal viva), esta adquiere su denominación, pudiendo ser:

### 4.1. Dolomita

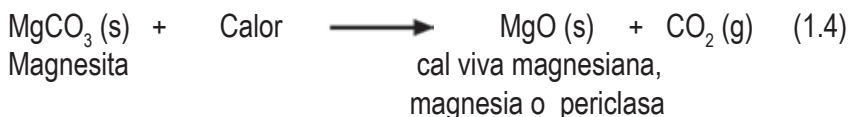
Es el carbonato doble de calcio-magnesio, el que al calcinarlo se descompone en óxido de calcio-magnesio ( $\text{CaO} \bullet \text{MgO}$ ), de acuerdo a la siguiente reacción química



La que usualmente contiene entre un 35% a 40% de MgO.

### 4.2. Magnesita

Es el carbonato de magnesio, que al ser sometido a calcinación se disocia en óxido de magnesio, de acuerdo a lo siguiente:



Producto con una solubilidad de  $6,8 \times 10^{-3}$  g/l a  $0^\circ\text{C}$  y de  $3 \times 10^{-3}$  g/l a  $100^\circ\text{C}$ .

### 4.3. Calcita

Es el carbonato de calcio, que al calcinarlo se descompone en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y anhídrido carbónico, de acuerdo a la siguiente reacción química:

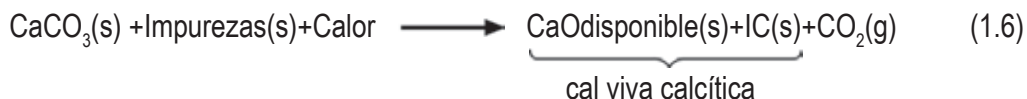


El contenido de MgO fluctúa entre 0,5% a 2,5%. Si éste carbonato contiene cantidades sustanciales de sílice, alúmina, hierro, se obtiene la **cal viva hidráulica**.

De acuerdo al grado de calcinación y a los fundentes que contenga la materia prima, se obtiene la cal viva calcítica de **alta, mediana o baja** reactividad, siendo ésta reactividad la medida del tiempo de residencia que necesita la cal en el proceso de hidratación.

En forma vulgar la descarbonatación significa que cuando el calor llega al mineral de carbonato de calcio, éste inicia su descomposición y comienza a generarse el óxido de calcio y en la superficie se desarrollan las reacciones que forman el requemado de éste último, produciéndose el óxido de calcio combinado.

Por lo tanto, el grado de calcinación va a depender de varios factores, entre otros, tamaño granulométrico de la materia prima o heterogeneidad física, cantidad de calor absorbido por cada partícula para lograr la disociación, las impurezas que se enlazan al calcio, tipo de horno utilizado, etc., entonces en la reacción química para lograr la disociación en un proceso industrial, debemos tener presente que en la explotación industrial de calizas, es imposible obtener partículas geoméricamente homogéneas, mono tamaños o mono granulares; por lo general se producen partículas de diferentes tamaños, y con distinta forma. Por otro lado, la tecnología permite una calcinación adecuada cuando la relación entre el tamaño mayor y el menor es 1:3. En el horno, el calor generalmente no es constante, por lo que la disociación del CaO y el CO<sub>2</sub> es diferente, para las partículas grandes y las pequeñas. Si a ello, le agregamos que las calizas vienen con impurezas asociadas, la reacción química industrial es la siguiente:



Donde :

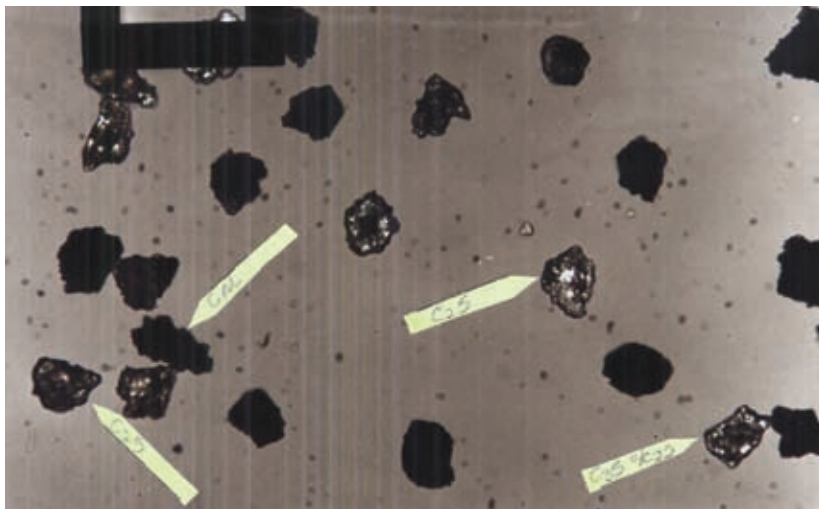
El CaO, disponible(s) o total, está conformado por el CaO útil + CaO requemado + CaO crudo y por el IC(s) que corresponde a las impurezas concentradas.

El CaO útil, corresponde al CaO libre generado durante la calcinación y cuyo pH natural es 12,6. Generalmente se encuentra entre la capa superficial de la partícula, que corresponde al material requemado por sobreexposición al calor y el núcleo de ésta, que es donde queda el material crudo, sin calcinar.

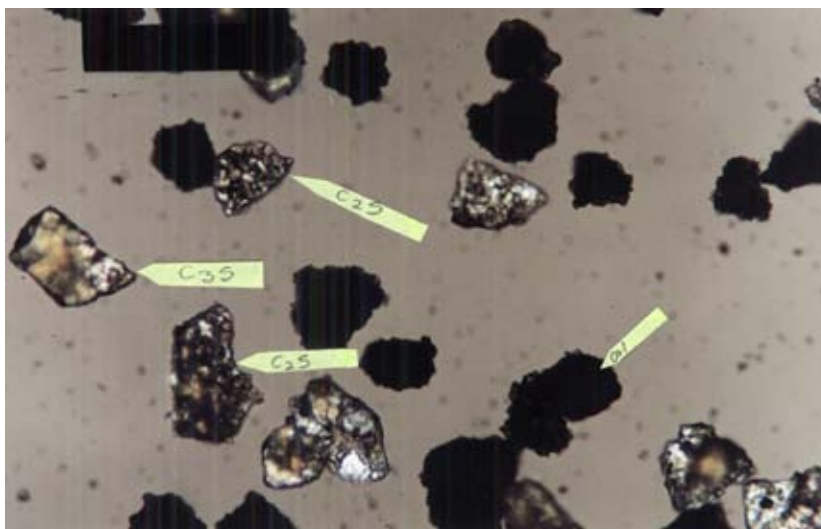
El CaO requemado se encuentra en la superficie de la partícula, es el CaO que se ha combinado, por exceso de calor, durante la calcinación, con la sílice, la alumina o el hierro contenido en las calizas y cuyo pH natural es entre 12,6 a 12,8 o más. Generalmente corresponde a la parte exterior de las partículas grandes y a la totalidad de las partículas pequeñas. Según literatura de la química del cemento, se refiere a la formación de silicatos y aluminatos cálcicos (CS; C2S; C3S; C3A; y C4AF) y está representado por las siguientes reacciones químicas:



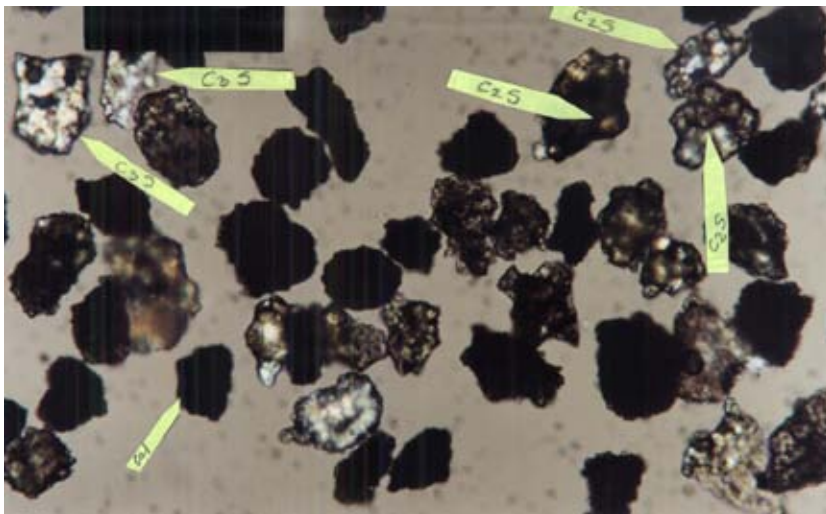
Según análisis en laboratorio de microscopía óptica, donde se observaron muestras de cal viva en polvo, entre 32 a 44 micrómetros y entre 44 a 75 micrómetros, con el método de luz transmitida, se obtuvieron las Fotografías 1 a 4, que indican la presencia de estos compuestos.



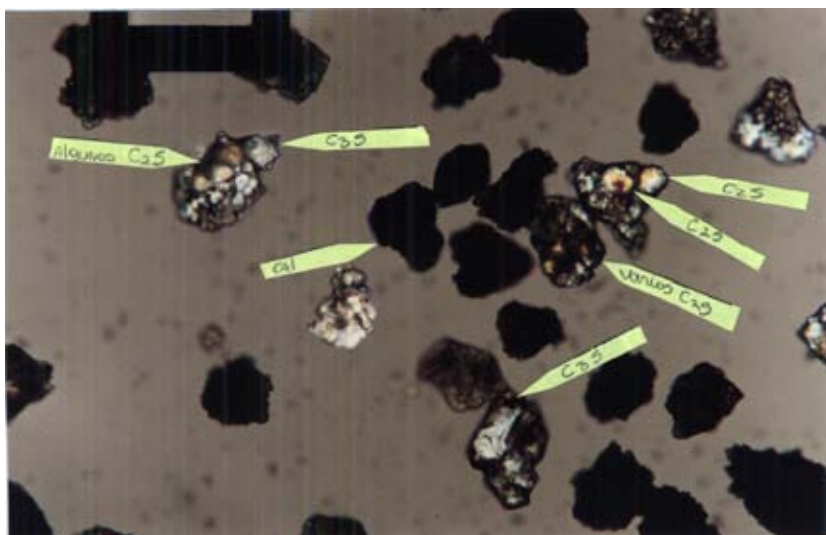
Fotografía 1: Luz transmitida, 20X, polarizador y nicoles cruzados. Tamiz entre 32 a 44 micrómetros. La flecha que se encuentra a la izquierda indica C2S, la flecha que está en el centro muestra C2S muy pequeños unidos entre sí y la flecha del extremo derecho identifica C3S con incrustaciones de C2S.



Fotografía 2: Luz transmitida, 20X, polarizador y nicoles cruzados. Tamiz entre 44 y 75 micrómetros. La flecha que muestra el C3S, se refiere a todo el cristal, en cambio las flechas que muestran el C2S, son varios C2S redondeados que aparecen en el cristal.



Fotografía.3: Luz transmitida, 20X, polarizador y nicoles cruzados. Tamiz entre 44 a 75 micrometros. A la izquierda se observan 2 flechas que indican C3S, es todo el cristal en forma hexagonal y al lado derecho, las 3 flechas muestran C2S, son los redondeados, algunos de un tono ámbar que se encuentran unidos entre sí.



Fotografía 4: Luz transmitida, 20X, polarizador y nicoles cruzados. Tamiz entre 44 - 75 micrómetros. Las flechas indican C3S; y C2S. Los C2S son de forma redondeada, generalmente los C2S se encuentran agrupados.

Para comprobar la capacidad alcalinizadora de los compuestos anteriormente mencionados se realizó en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Católica del Norte, la “Determinación de especies o compuestos alcalinizantes en la cal de INACESA”.

Allí, las muestras de cal viva e hidratada, fueron sometidas a análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), previo análisis calcográfico en microscopio óptico.

Este tipo de microscopio utiliza electrones en vez de luz y aumentan los objetos hasta 250.000 veces, produciendo imágenes en blanco y negro.

El análisis por MEB sirve para examinar la superficie de los objetos. Entrega imágenes de gran aumento y muestra la forma real de ellos. Trabaja examinando la superficie de un objeto con un delgado haz electrónico.

La microscopía de barrido electrónica permite verificar la existencia de compuestos alcalinizantes, que para el caso de la cal de INACESA de la planta de Antofagasta, fue a través de perfiles por elemento, tal como se muestra en las Figuras 7 a 15 siguientes, que corresponden a la comparación de caliza, de cal y cal más agua, por un tiempo de reacción de 9 minutos respectivamente.

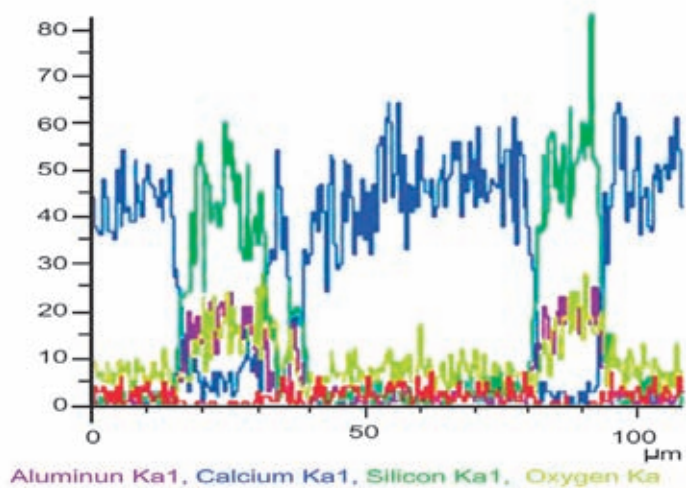
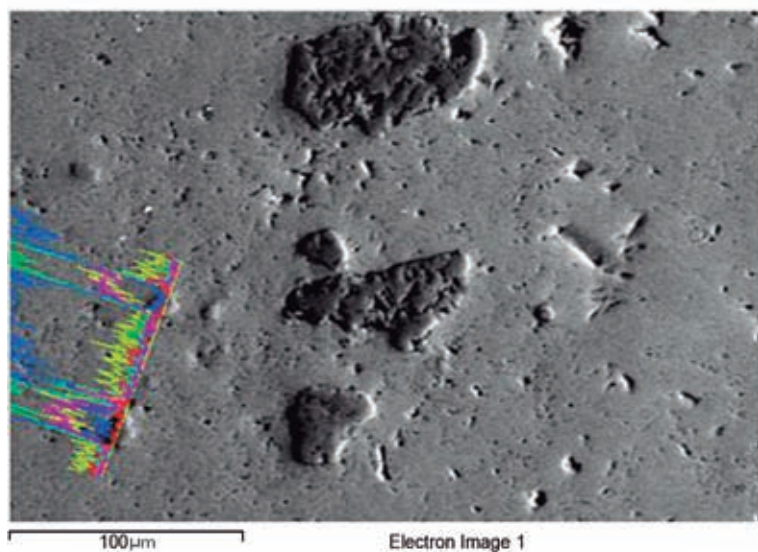


Figura 7: Perfil de caliza de Antofagasta de elementos; (a) Perfil entre dos partículas de aluminosilicato, (b) Espectro de elementos presentes en el perfil.

En la Figura 8 se muestran tres granos de carbonato de calcio en una matriz de silicatos.

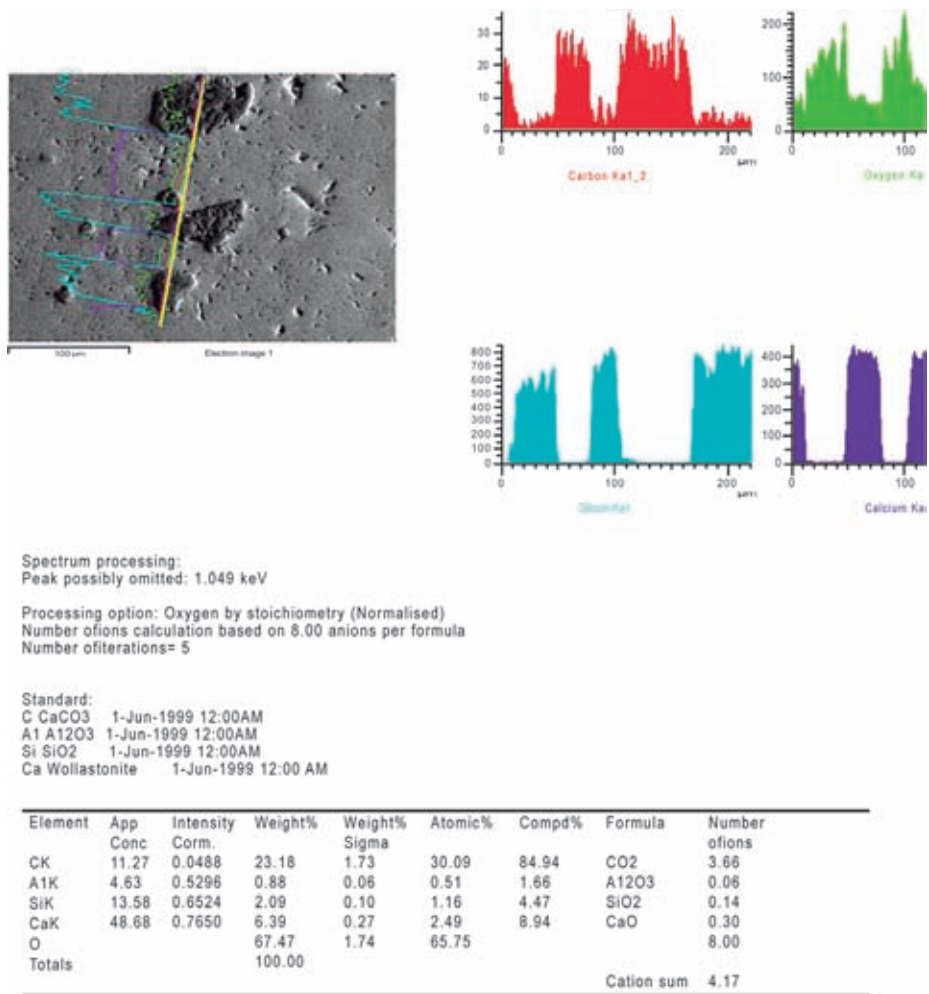


Figura 8: Perfil de elementos en caliza; (a) Perfil entre tres partículas de aluminosilicato; espectros del carbono (b), oxígeno (c), silicio (d) y calcio (e)

En la Figura 9 se presenta la cal sin reaccionar con agua y se detecta la presencia de silicatos cálcicos (en este caso un ferrito aluminato de calcio, CAF). Dichos compuestos se forman en el horno de calcinación, los cuales se encuentran en varios puntos de la muestra cuando se realiza el barrido electrónico.

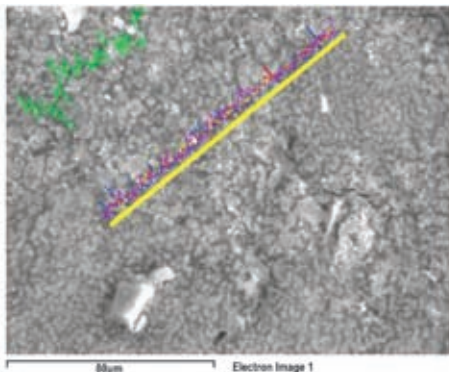


Figura 9a

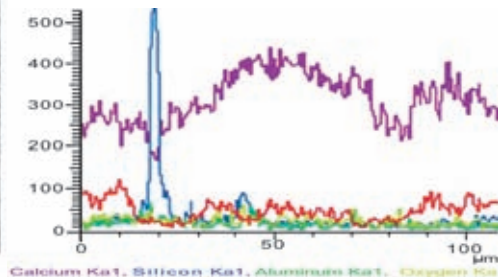
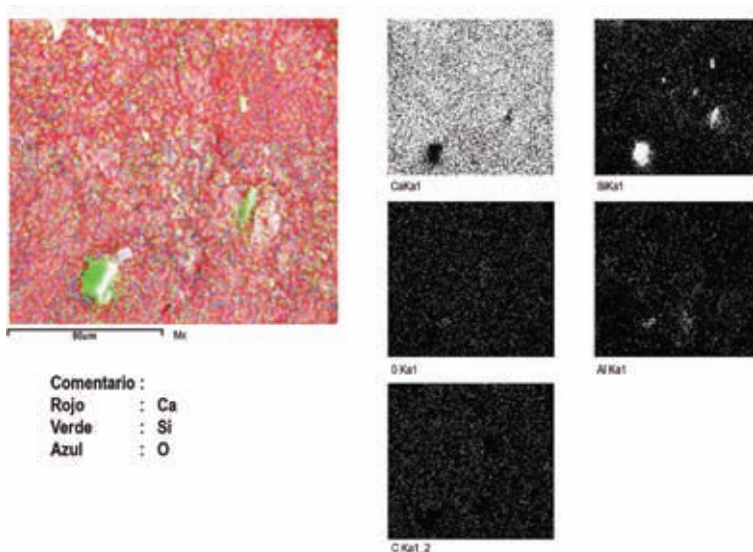


Figura 9b

**Figura 9a y 9b: Perfil de elementos para cal sin hidrólisis; (a) Perfil entre dos partículas de aluminosilicato, (b) Espectro de elementos presentes en el perfil**

Los silicatos cálcicos, CS, en algunos casos se presentan junto a aluminio y hierro, tal como se presenta en la Figura 10, la que también, corrobora la presencia de los silicatos cálcicos, CS, a través de la interacción que se da entre los elementos que forman dichos compuestos (Ca, Si, O, Al), y se manifiesta en la coloración diferente a la roja (predominancia del elemento calcio).



**Figura 10: Mapeo de elementos de cal de Antofagasta sin hidrólisis**

En las Figuras 11 a 15, se presentan algunas vistas de la reacción de hidrólisis de la cal.

Al reaccionar la cal, a distintos tiempos, con agua (reacción de hidrólisis), el análisis por MEB detecta e identifica compuestos de aluminosilicatos (CA) y/o ferro aluminosilicatos de calcio (CAF). Dichos compuestos son posibles de obtener a tiempos cortos, 3 minutos, de reacción de hidrólisis.

Estos compuestos se presentan proporcionalmente en mayor cantidad a medida que aumenta el tiempo de hidrólisis. Esta información es similar a la obtenida , para el caso de la cal INACESA de la planta de Copiapó, observando que desde el punto de vista cinético, el compuesto que primero reacciona con el agua es el CaO útil y posteriormente los silicatos cálcicos de la cal combinada.

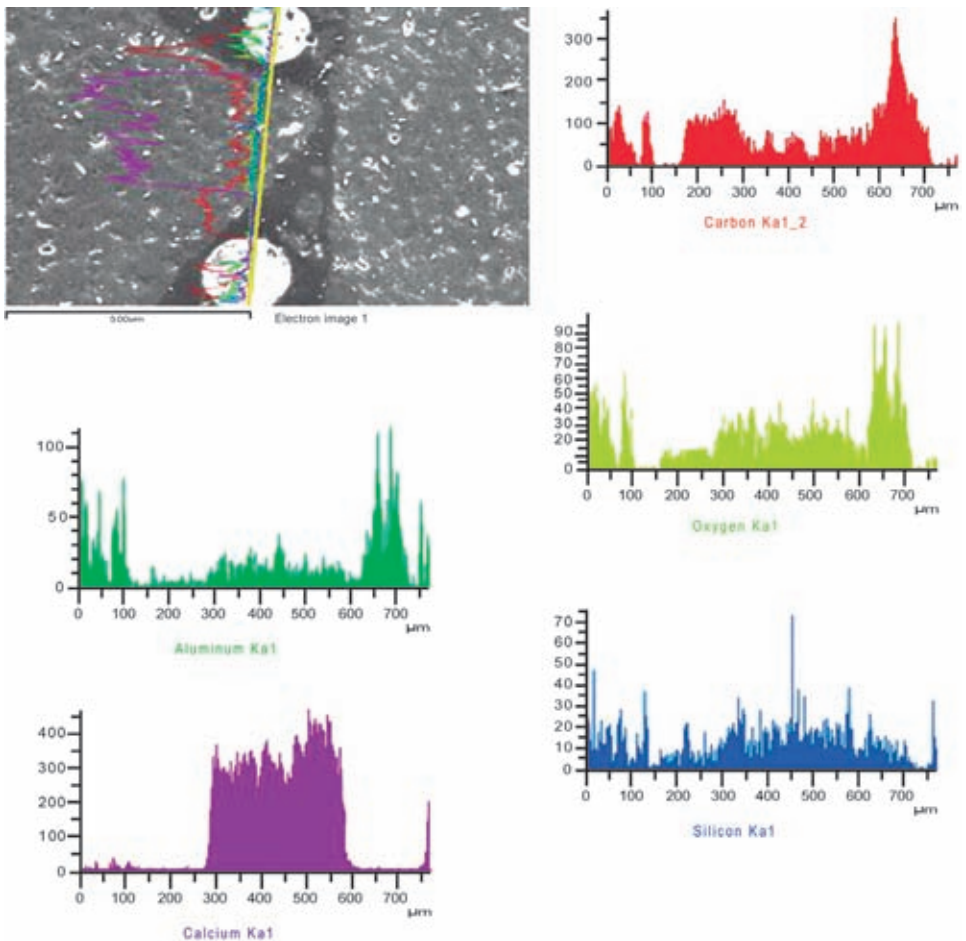


Figura 11: Perfil de elementos para 3 minutos de reacción de hidrólisis; (a) Perfil entre dos partículas de aluminosilicatos de calcio; espectros del carbono (b), oxígeno (c), aluminio (d), silicio (e) y calcio (f)

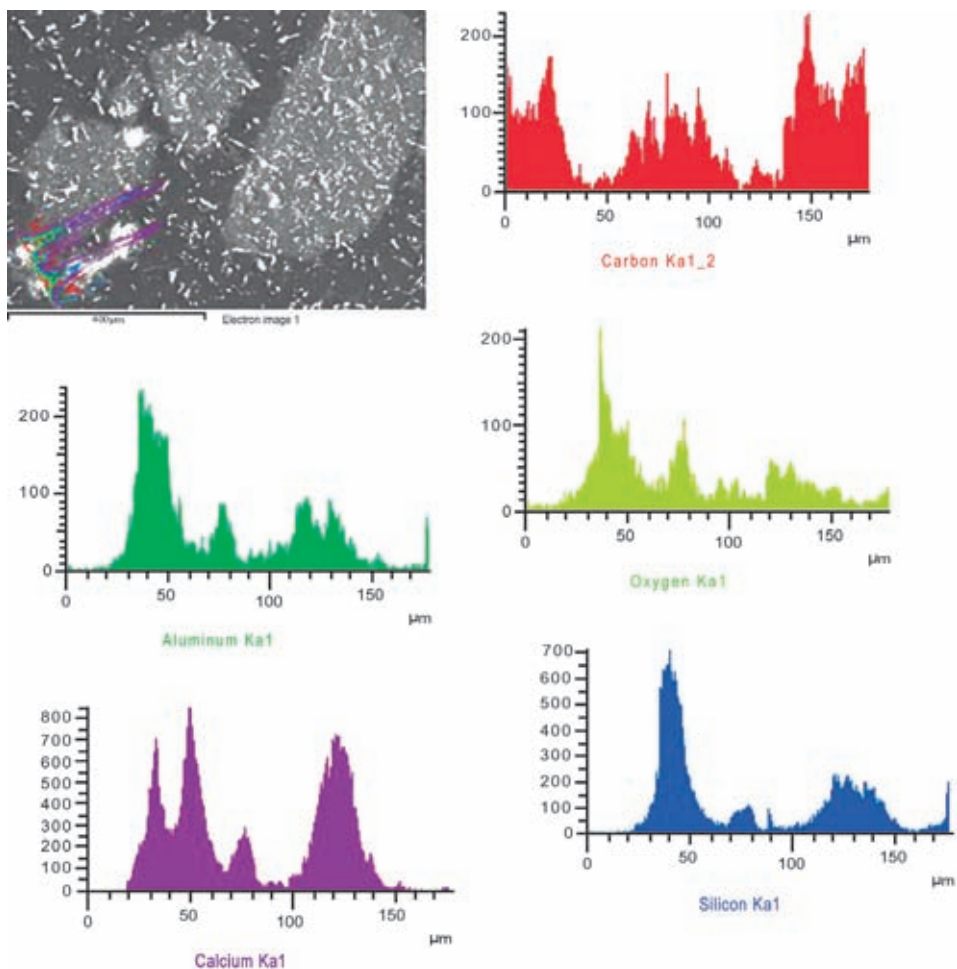


Figura 12: Perfil de elementos para 6 minutos de reacción de hidrólisis; (a) Perfil entre dos partículas de aluminosilicatos de calcio; espectros del carbono (b), oxígeno (c), aluminio (d), silicio (e) y calcio (f)

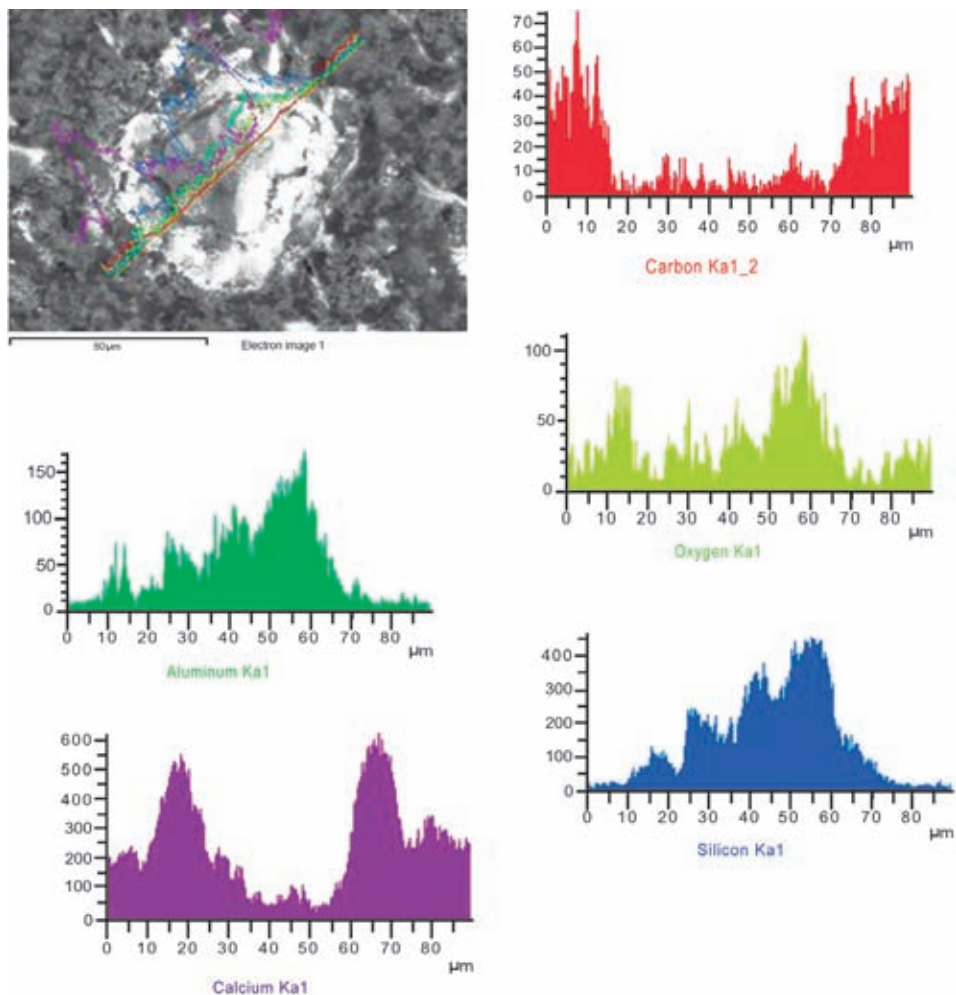


Figura 13: Perfil de elementos para 9 minutos de reacción de hidrólisis; (a) Perfil para partícula cuyo núcleo es un aluminosilicato rodeado de carbonato de calcio; espectros del carbono (b), oxígeno (c), aluminio (d), silicio (e) y calcio (f)

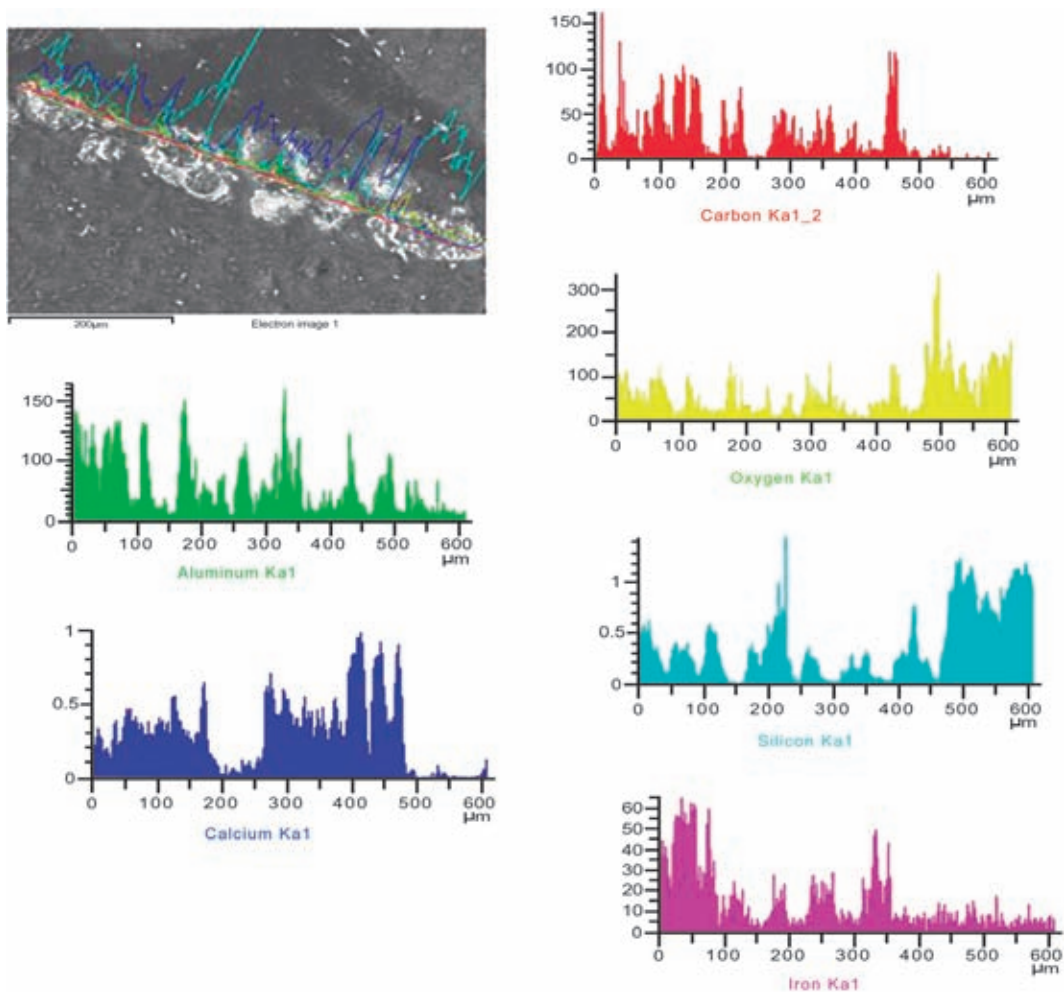
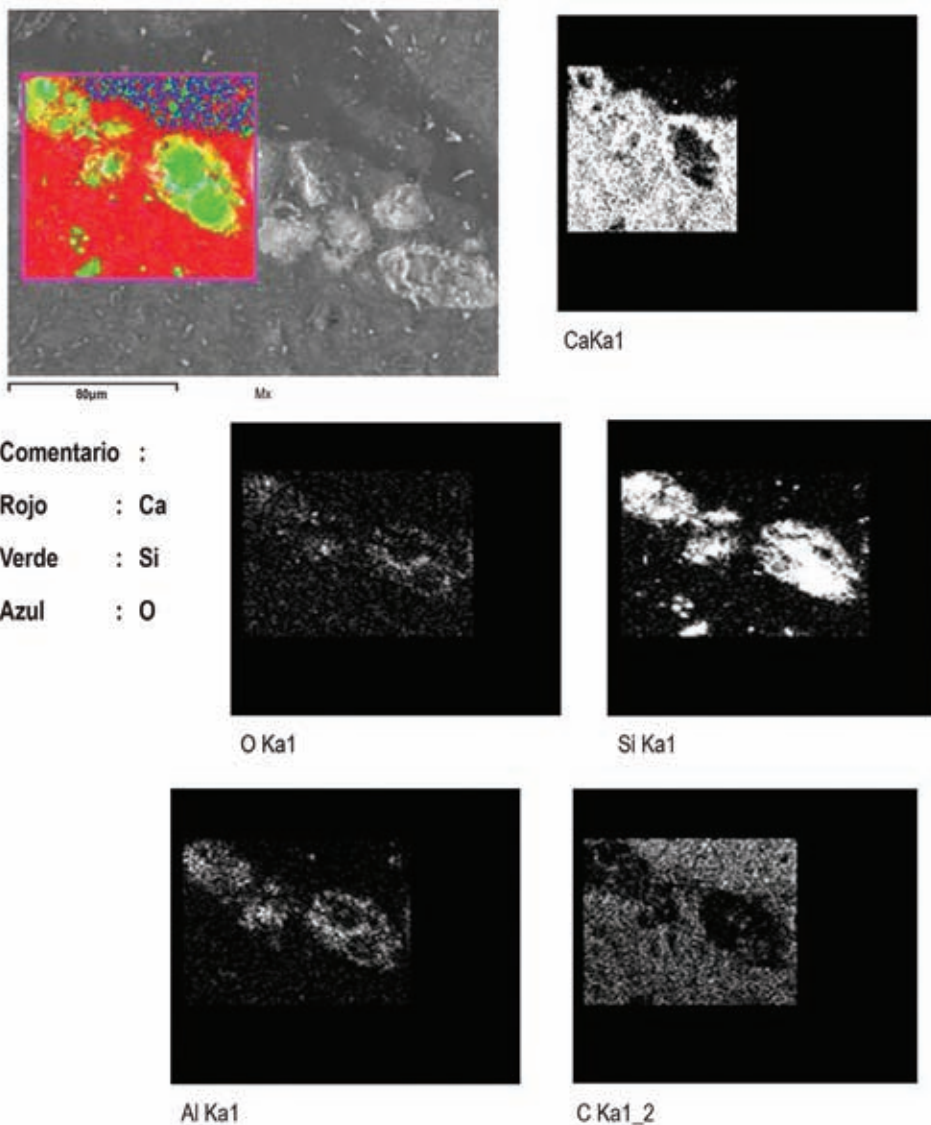


Figura 14: Perfil de elementos para 15 minutos de reacción de hidrólisis; (a) Perfil para diferentes partículas; espectros del carbono (b), oxígeno (c), aluminio (d), silicio (e), calcio (f) y hierro (g)



**Figura 15: Mapeo de elementos para 15 minutos de reacción de hidrólisis**

La presencia de dichos compuestos se corrobora con los mapeos que entrega el análisis por MEB, y en esta ocasión, se muestran para dos casos, con y sin reacción de hidrólisis. Es decir, para la cal sin reaccionar con agua (Figura 10), al detectar este tipo de elementos, queda constancia de que ellos se forman en el proceso de calcinación de la caliza, donde reaccionan los silicatos de la ganga con el carbonato de calcio.

A medida que transcurre el tiempo de reacción con agua, se logra detectar mayor presencia de silicatos cálcicos (Figura 15) y/o ferro aluminosilicatos cálcicos, compuestos que contribuyen a la alcalinización de una pulpa mineral

Tal como se planteó para la cal de Copiapó, se observan efectos similares a la cal de Antofagasta, los que se presentan a continuación en algunas vistas de interés, en las Figuras 16 a la 19.

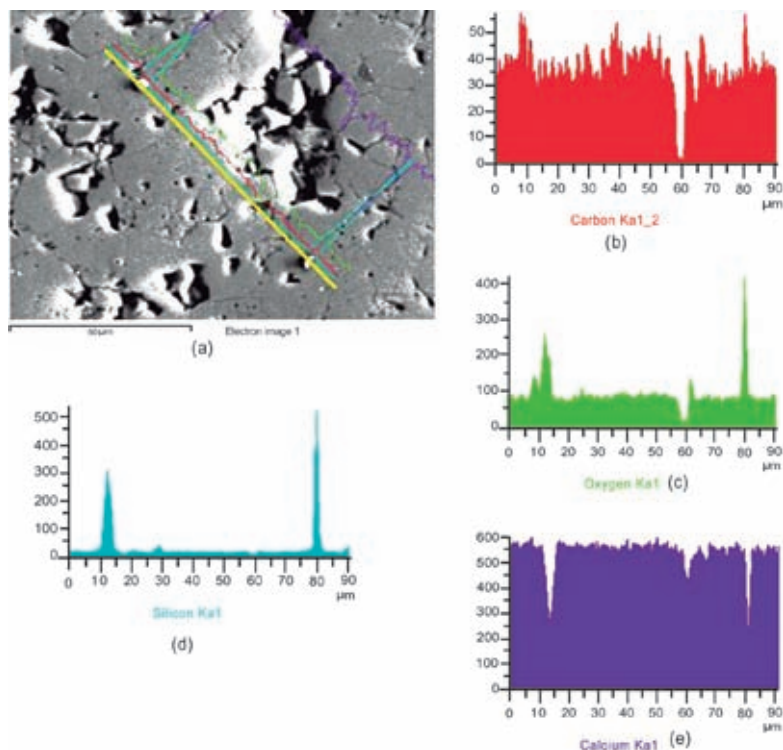


Figura 16: Perfil de elementos en caliza; (a) Perfil de elementos; espectros del carbono (b), oxígeno (c), silicio (d) y calcio (e)

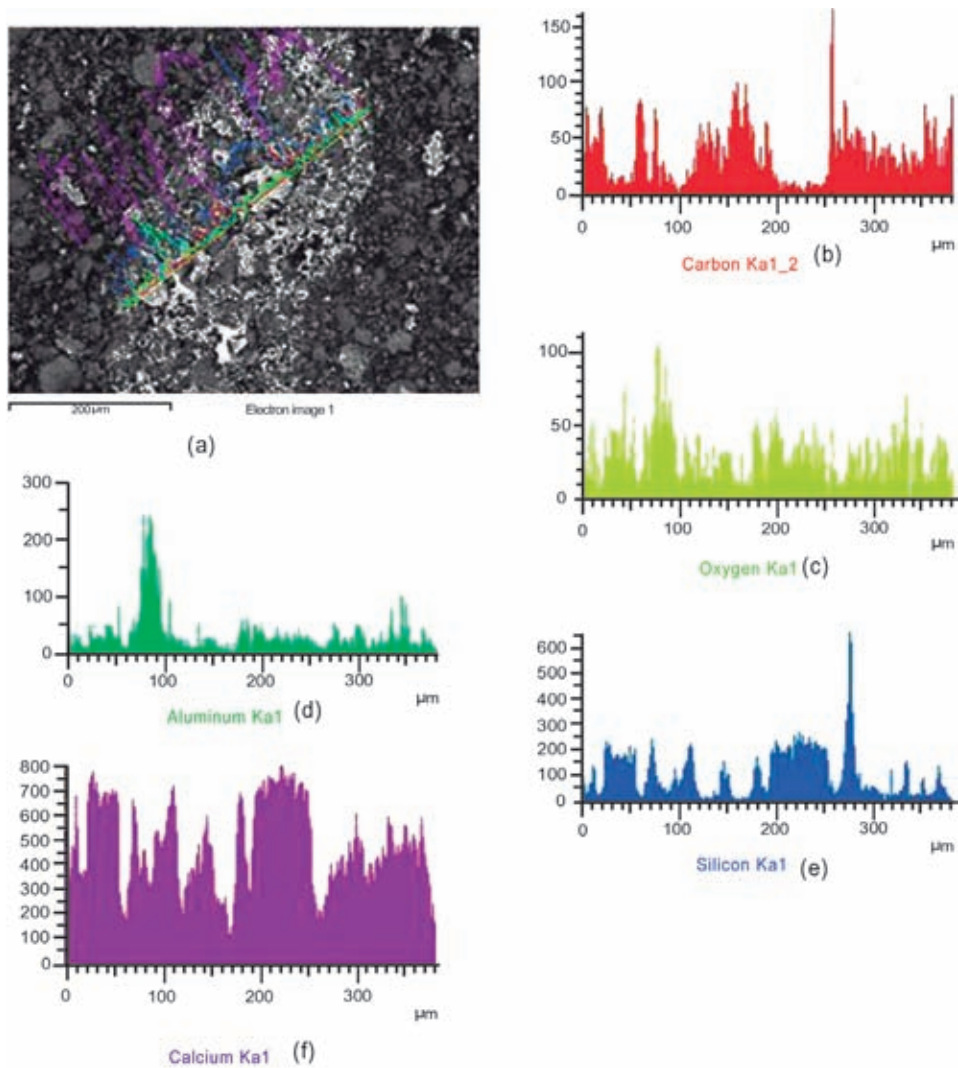


Figura 17: Perfil de elementos para cal sin hidrólisis; (a) Perfil entre partículas de aluminosilicato; espectros del carbono (b), oxígeno (c), aluminio (d), silicio (e), calcio (f)



200µm Mx



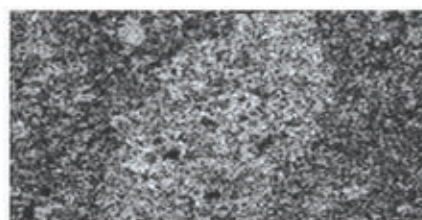
O Ka1

Comentario :

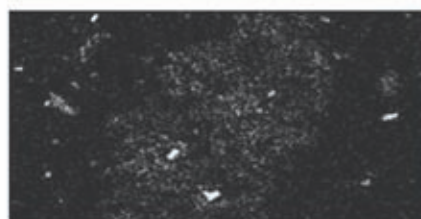
Rojo : Ca

Verde : Si

Azul : O



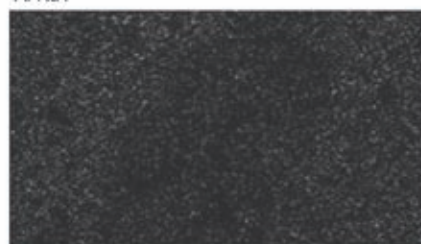
Ca Ka1



Si Ka1

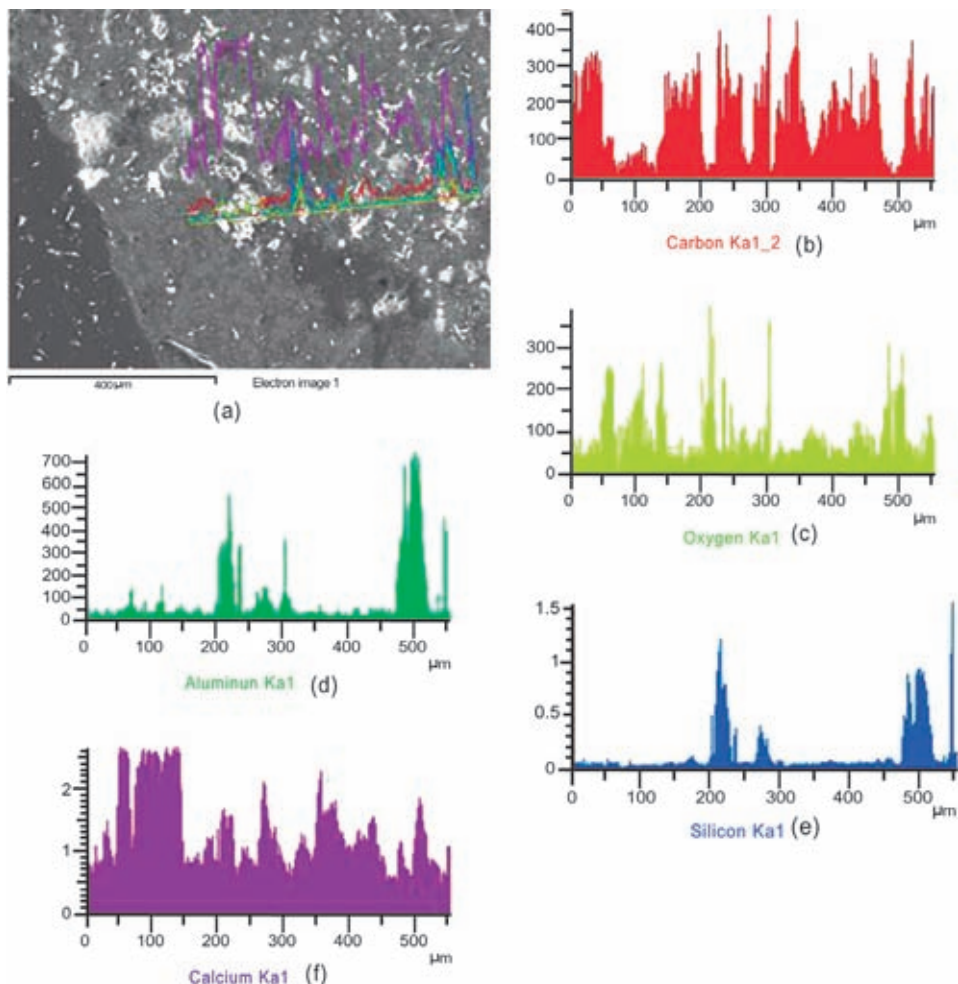


Al Ka1



C Ka1\_2

Figura 18: Mapeo de elementos de cal de Copiapó sin hidrólisis

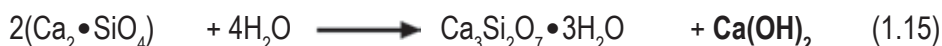
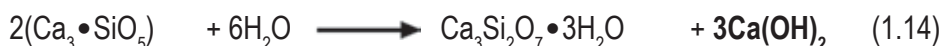


**Figura 19: Perfil de elementos para 15 minutos de reacción de hidrólisis; (a) Perfil para diferentes partículas; espectros del carbono (b), oxígeno (c), aluminio (d), silicio (e), calcio (f)**

Los resultados para la cal de INACESA Planta de Copiapó muestran la presencia de cal y aluminosilicatos, los cuales no son tan abundantes como los que provienen de la cal INACESA de Antofagasta, y en muchos casos, para confirmar la existencia de dichos compuestos, hubo que observar en el análisis por MEB a aumentos muy superiores a los utilizados con la cal Antofagasta, del orden de 5 a 10 micrómetros.

En resumen, el análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB), muestra que junto a la cal existen y se identifican silicatos, aluminosilicatos y ferro aluminosilicatos cálcicos, (CS; C2S; C3S; C3A; y C4AF) que son los compuestos que alcalinizan un sistema acuoso o una pulpa mineral.

Lo anterior se debe a la reacción de hidrólisis de los compuestos quemados, productos de las reacciones 1.7 a 1.11 (CaO quemado) contenido en la cal, cuyas reacciones químicas al mezclarse con agua son las siguientes:



La generación de  $\text{Ca(OH)}_2$  es lo que posteriormente al agregar agua se disocia en cationes  $\text{Ca}^{+2}$  y 2 aniones, hidroxilo o grupos  $\text{OH}^-$ , permitiendo otorgar alcalinidad y subir el pH a un sistema determinado.

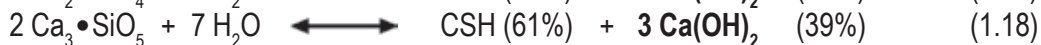
J. H. Oates demuestra el mecanismo anterior en el punto 20.7.1 de su libro, definiendo tres escenarios para determinar la actividad química de la cal

- Su valor neutralizante: que equivale a la suma de:  $\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO} + \text{Mg(OH)}_2$  + la parte del CaO que se encuentra enlazado con los silicatos y aluminatos.
- Su contenido de CaO útil: que equivale a la suma de:  $\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2$  y
- La cal soluble en agua: que equivale a la suma de:  $\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2$  + parte del  $\text{Mg(OH)}_2$  + la parte del CaO que se encuentra enlazado con los silicatos y aluminatos.

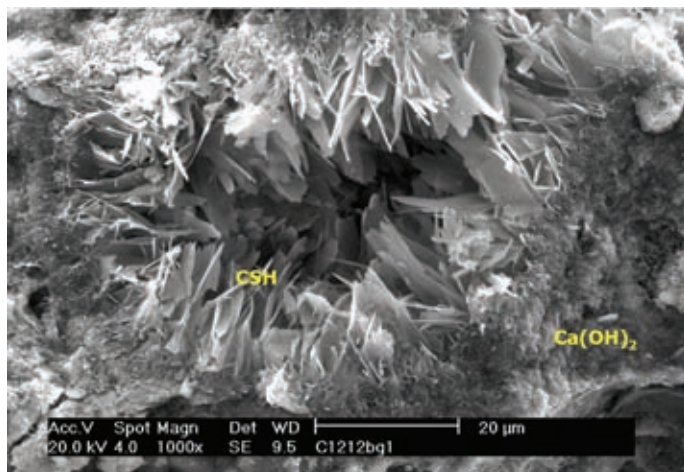
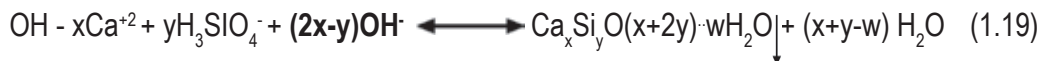
Lo anterior indica que la actividad química está referida a la capacidad de generación de grupos  $\text{OH}^-$  que pueda desarrollar la cal con todos los componentes presentes en ella y que generan alcalinidad.

Por otro lado, en el trabajo realizado por investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid, donde muestran las características de los residuos radiactivos para su almacenamiento y gestión, entre otros, en la estabilización de los residuos generados, mencionan al hormigón como un material para encapsularlos, lo que los obliga a caracterizar el cemento y las propiedades útiles para este fin. Entre la caracterización mencionan el silicato tricálcico,

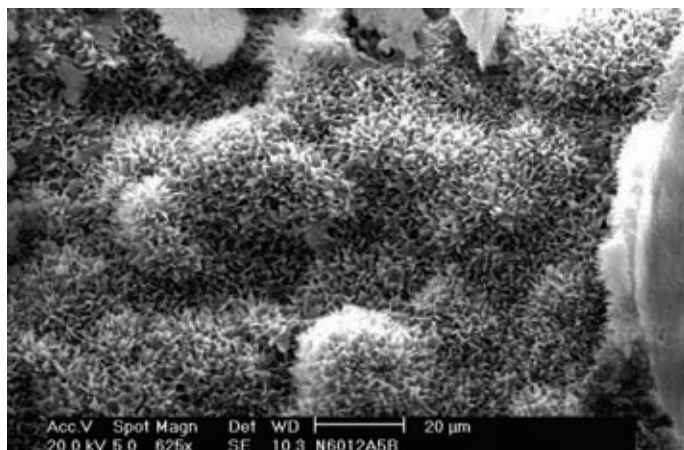
$\text{Ca}_3 \bullet \text{SiO}_5$ , (reacción 1.9) y el dicálcico,  $\text{Ca}_2 \bullet \text{SiO}_4$ , (reacción 1.10) donde en sus fases hidratadas son los que forman la fase gel que denominan CSH (Cal, Sílice, Hidratos), cuyas reacciones las describen de la siguiente forma:



Estableciendo la siguiente relación entre el calcio, el ácido silícico y los grupos



Fotografía 5: muestra que en la hidratación de los silicatos cálcicos, CSH, se genera hidróxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  (Gentileza de Raquel Vigil de la Villa y Jaime Cuevas, Universidad Autónoma de Madrid).



Fotografía 6: otro testimonio del  $\text{Ca(OH)}_2$  formado (Gentileza de Raquel Vigil de la Villa y Jaime Cuevas, Universidad Autónoma de Madrid).

Por otro lado, el CaO crudo corresponderá al  $\text{CaCO}_3$ , expresado como CaO, que no logra la disociación durante la calcinación, por falta de calor, . En general éste corresponde al centro de las partículas más grande, y cuyo pH natural es el mismo de la caliza 8,2.

Esquemáticamente, el proceso industrial de la calcinación de las calizas se podría representar como se indica en la Figura 20 para el caso de tres partículas de distinto tamaño:

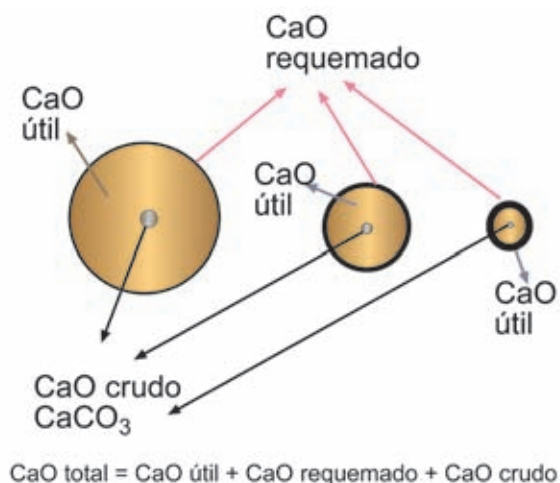


Figura 20: Calcinación de la caliza

## **5. IMPUREZAS**

El contenido de impurezas en los distintos tipos de cal, va a depender de las que se encuentren en la materia prima, entre las más comunes están principalmente: el silicio, el aluminio, el hierro, el azufre, el magnesio y los metales alcalinos, entre otras. En algunos casos hay trazas de fundentes y pigmentos, tales como: el manganeso y el flúor, que le otorgan al producto distintas tonalidades en su color, fluctuando desde el blanco, al beige, e incluso algunas alcanzan el negro, siendo esta última característica una propiedad física, que no altera sus propiedades de alcalinización ni su calidad en la capacidad o valor alcalinizante. La presencia de estos elementos, puede ser muy importante en algunos usos o aplicaciones de la cal donde tanto el manganeso, como el flúor, afectan o perjudican el proceso en la cual la cal es adicionada o, quedan asociados en el residuo final que se genere.

## 6. TIPOS DE CAL

En el mercado chileno se pueden encontrar los siguientes tipos de cal:

### 6.1. Cal Viva

La cal viva es caliza calcinada, formada principalmente por óxido de calcio u óxido de calcio enlazado con óxido de magnesio y que es capaz de hidratarse con agua.

Existen dos tipos: la **cal viva de alto calcio** que tiene una solubilidad a 0 °C de 1,4 g/l y a 100°C de 0,54 g/l (Ver Tablas 4 y 5 en páginas siguientes) y la **cal viva dolomítica**

La **cal viva alto calcio** es la que general y mayoritariamente se produce en Chile.

#### 6.1.1 Solubilidad de la cal calcítica en agua.

La solubilidad de la cal es inversa a la temperatura, es decir, a mayor temperatura menor solubilidad y viceversa, y como la cal viva al mezclarse con agua genera calor, éste afecta finalmente en la concentración de sólidos en la lechada de cal. La Tabla 4 muestra el comportamiento de esta variable según la temperatura.

La solubilidad de la cal industrial en agua, no varía más de un 7% que la solubilidad de la cal teóricamente pura. Estas diferencias se deben probablemente a la presencia de trazas de hidróxidos de sodio y potasio en esta cal. La presencia de magnesio, sílice y carbonatos no tienen efectos sobre la solubilidad de la cal, pero pueden tener un marcado efecto sobre la razón de solución y la generación de alcalinidad.

El tamaño de partículas (que es analizado en el tema lechada de cal) tiene una considerable influencia sobre la solubilidad. La cal recién apagada, cuyo tamaño de partícula es pequeño, es alrededor de un 10% más soluble que la partícula gruesa de la cal apagada y envejecida. Este efecto se debe al crecimiento de las partículas secas de cal durante su envejecimiento. (Fuente: National Lime Association).

g/100 g solución saturada		
Temperatura	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>
[°C]		
0	0.14	0.185
10	0.133	0.176
20	0.125	0.165
25	0.12	0.159
30	0.116	0.153
40	0.106	0.140
50	0.097	0.128
60	0.088	0.116
70	0.079	0.104
80	0.070	0.092
90	0.061	0.081
100	0.054	0.071

**Tabla 4: Solubilidad de la cal calcítica en agua (Fuente: National Lime Association).**

Aunque el agregado de azúcar de caña a la disolución de cal aumenta la solubilidad de la cal, hasta un límite de concentración de 35 g de azúcar, mayor cantidad de la indicada genera una capa sobre la partícula de cal que la cubre y no permite su disolución, la temperatura sigue siendo influyente en la disolución de la misma, la Tabla 6 muestra las cantidades de cal soluble que se han encontrado según la concentración de azúcar incorporada y la temperatura de la suspensión.

25°C			80°C		
g/100 g de sol. sat.		Fase Sólida	g/100 g de sol. sat.		Fase Sólida
Azúcar	CaO		Azúcar	CaO	
0,0	0,122	Ca(OH) <sub>2</sub>	0,00	0,071	Ca(OH) <sub>2</sub>
2,1	0,242	Ca(OH) <sub>2</sub>	4,90	0,117	Ca(OH) <sub>2</sub>
4,2	0,461	Ca(OH) <sub>2</sub>	9,90	0,189	Ca(OH) <sub>2</sub>
6,6	0,750	Ca(OH) <sub>2</sub>	14,75	0,230	Ca(OH) <sub>2</sub>
8,6	1,110	Ca(OH) <sub>2</sub>	19,50	0,358	Ca(OH) <sub>2</sub>
11,8	1,860	Ca(OH) <sub>2</sub>	24,60	0,548	Ca(OH) <sub>2</sub>
15,4	2,760	Ca(OH) <sub>2</sub>	29,70	1,017	Ca(OH) <sub>2</sub>
21,1	4,530	Ca(OH) <sub>2</sub>			
27,2	6,720	Ca(OH) <sub>2</sub>			
31,4	8,390	Ca(OH) <sub>2</sub>			
35,2	9,800	Ca(OH) <sub>2</sub> +			
35,0	10,100	Sacarado			
43,7	8,840	Sacarado			
53,2	7,870	Sacarado			
68,3	4,080	Sacarosa			

**Tabla 5: Solubilidad de la cal en solución acuosa de azúcar de caña a diferente temperatura**

Los valores indican que la cal en contacto con una solución de azúcar es progresivamente cubierta por una capa de sacarato, la cual no le permite el avance de la solubilidad de ésta. Este proceso es más rápido al aumentar la temperatura, por lo tanto para una máxima solubilidad de la cal, es preferible emplear bajas temperaturas. (Fuente: National Lime Association).

De acuerdo a las materias primas utilizadas en la calcinación y a la presión residual de anhídrido carbónico en el interior del horno, se puede obtener un producto de alta calidad industrial con una composición química estable y de baja variabilidad.

### 6.1.2. Componentes alcalinizantes de la cal

Considerando que el interés en la utilización de la cal, además del aporte de basicidad o capacidad alcalinizante que tenga, radica en la capacidad de ésta para hidratarse en agua, y formar un polvo fino y seco, resulta claro que para realizar la operación de hidratación con una alta velocidad de reacción y obtener como producto un polvo fino y seco, lo que se requiere de la cal es su máxima reactividad al agua.

Mientras que para obtener o conocer el aporte de basicidad o capacidad alcalinizante de la cal, la reactividad de ésta no tiene importancia alguna, ya que para este caso, por su baja solubilidad, se requiere tener la cal en una suspensión acuosa (por su baja solubilidad) que

sea capaz de solubilizarse rápidamente al mezclarla con mayor cantidad de agua y alcance su máxima solubilidad, 1,4 kg/m<sup>3</sup>, por lo tanto para la cal es necesario que esto ocurra en valores cercanos a la temperatura ambiente o más baja que ésta, para ser adicionada al proceso que se necesita alcalinizar. En este caso, es conveniente destacar que normalmente la basicidad la entrega el contenido de óxido de calcio total o disponible de la cal, que corresponde a la suma del contenido de calcio crudo (carbonato que no reaccionó en el proceso de calcinación) el contenido de calcio requemado (calcio que durante la calcinación se enlazó con la sílice, el aluminio y el hierro presente en la materia prima) y el óxido de calcio reactivo, útil, o libre.

Tal como se mencionó anteriormente, el óxido de calcio crudo contenido en la cal viva, llamado en la industria productora de cal como CaO Crudo, es el carbonato de calcio que no logró llegar al estado de disociación y que la basicidad que aporta es un pH 8,2.

El óxido de calcio formado por una calcinación a mayor temperatura que la adecuada y necesaria (para la descomposición del carbonato) se enlaza formando una escoria con las impurezas contenidas en las calizas. Generalmente, en la industria productora de cal se le denomina cal requemada, CaO(r), y la tendencia a hidratarse cuando se hace reaccionar con agua es similar al CaO reactivo, útil o libre, alcanzando valores de pH entre 12,5 a 12,8.

El CaO útil, también conocido como cal libre o cal reactiva también aporta basicidad, sobre pH 12,5 y es capaz de hidratarse fácilmente al reaccionar con agua, basta que esté en contacto con la humedad relativa ambiental para que ello ocurra.

Al igual como existen técnicas analíticas, tanto volumétricas como gravimétricas, que son útiles para cuantificar el contenido de CaO disponible o total; o la cal cruda (análisis por CaCO<sub>3</sub> o bien por CO<sub>2</sub>), la norma ASTM C-25 (en Anexo N° 2, punto 2.1.1, versión 2006), permite cuantificar el contenido de CaO útil, libre, o reactivo. Por lo tanto, el contenido de cal requemada, o combinada, es deducible por la diferencia entre los valores de cal disponible o total, la cal cruda y la cal útil, es decir:

$$\text{CaO requemado} = \text{CaO disponible o total} - (\text{CaO crudo} + \text{CaO útil}) \quad (1,20)$$

Las calizas que se utilizan como materias primas para fabricar la cal, normalmente tienen una pureza que fluctúa entre 93 y 95 % de CaCO<sub>3</sub>, por lo tanto, su contenido de impurezas oscila entre 5 y 7% respectivamente.

La reacción (1.1) de descarbonatación del carbonato de calcio,



Indica que el factor de concentración en un horno, con 100% de eficiencia, o estado ideal, será la relación  $\text{CaCO}_3/\text{CaO}$ , es decir:

$$\text{FC} = 100/56 = 1,786$$

Por lo tanto:

$$\text{Factor de Concentración} = 1,786.$$

Suponiendo que para fabricar cal, se utiliza -generalmente- como materia prima una caliza con un contenido de 94% de  $\text{CaCO}_3$ , por lo que el contenido de impurezas será la diferencia a 100%, es decir, de 6% .

$$\text{CaO disponible o total} = 56 \times 94/100 \text{ y } \text{CO}_2 = 44 \times 94/100$$

Por lo tanto, es equivalente decir que esta caliza, contiene un 52,64% de CaO disponible o total, y un 41,36% de  $\text{CO}_2$ .

La eficiencia de la calcinación de la caliza, generalmente, está asociada al contenido de anhídrido carbónico,  $\text{CO}_2$ , residual que se requiere dejar en la partícula a calinar, siendo esta una de las maneras de controlar el consumo de combustible requerido en dicha calcinación

Por lo tanto, si se considera una eficiencia de 98,5 %, o un  $\text{CO}_2$  residual de 1,5%, podemos definir que el factor de concentración corregido (FCC), tendrá la siguiente relación y valor:

ELEMENTO	MATERIA PRIMA	X% EFICIENCIA	98,5% EFICIENCIA o 1,5% DE $\text{CO}_2$ residual
CaO disponible o total	52,4	52,64	$52,64 \times 100/Y$
$\text{CO}_2$	41,36	X	1,5
Impurezas	6,00	6	$6 \times 100/Y$
Total	100,00	Y	100

Despejando términos:

$$[(52,64 \times 100/Y) + 1,5 + (6 \times 100/Y)] = 100 \quad (1.21)$$

$$Y = 5.864 / 98,5$$

Por lo tanto el FCC es:

$$100 / 59,53 = 1,6798$$

Lo anterior significa que el CaO se concentrará tomando el siguiente valor, de acuerdo a la materia prima escogida para este ejemplo:

$$52,64 \% \text{ CaO} \times 1,6798 = 88,42 \% \text{ de CaO disponible, para:}$$

CaO útil + CaO quemado + CaO crudo.

Para evitar una degradación de la cal útil, libre, o reactiva, debido al recubrimiento de la partícula por un aumento en la cantidad de cal quemada, a causa de una mayor temperatura o un mayor tiempo de residencia de la materia prima durante la calcinación, en la producción de cal es conveniente y económico mantener una presión de  $\text{CO}_2$  residual que fluctúe entre 1% a 2%, por lo tanto, si consideramos lo indicado en el ejemplo anterior, al dejar un 1,5% de  $\text{CO}_2$  residual, tendremos que:

$$\text{El } \text{CaCO}_3 \text{ corresponde a: } 1,5\% \times 100/44 = 3,41\%$$

Equivale en CaO crudo a:

$$3,41\% \times 56/100 = 1,91\%$$

Es decir: el 1,5 %  $\text{CO}_2$  es equivalente a un 1,91 % de CaO Crudo.

Ahora, si al CaO disponible le sustraemos el CaO crudo producto de la no calcinación del carbonato, debido a la presión que ejerce el  $\text{CO}_2$  residual, tendremos como CaO quemado más CaO útil lo siguiente:

$$88,42\% \text{ CaO(d)} - 1,91\% \text{ CaO(c)} = 86,51\% \text{ de CaO quemado + CaO útil}$$

Por lo tanto, en la cal tendremos la siguiente composición con capacidad alcalinizadora:

Cal total disponible	(CaO disponible)	88,42 %
Cal cruda	(CaO crudo)	1,91%
Cal útil	(CaO útil)	(86,51 - X)%
Cal quemada	(CaO quemada)	X%

La concentración de impurezas, es por lo tanto:

$$6 \times 1,6798 = 10,08 \%$$

Si suponemos que en la composición de las impurezas no existen elementos sublimables y que están conformadas sólo por silicio, los que durante la calcinación se enlazan químicamente mol a mol con el calcio, podemos decir que se consume un 10,08% del CaO total disponible para combinarse con las impurezas. Esto equivale entonces a que un 10,08% corresponde a CaO quemado, por lo tanto queda como valor máximo del contenido de CaO útil que podemos lograr en este ejemplo sólo un 76,43 %.

$$86,51 - 10,08 = 76,43\%.$$

La capacidad alcalinizante en la distribución del CaO total disponible (88,42%) de este ejemplo, resulta ser:

Cal cruda	(CaO crudo)	1,91%
Cal libre	(CaO libre)	76,43%
Cal quemada	(CaO quemada) +	10,08%
Cal total resultante	(CaO disponible)	88,42

La distribución porcentual de los compuestos, en el total de la cal obtenida, será la siguiente:

Cal cruda	(CaO crudo)	1,91%
Cal libre	(CaO libre)	76,43%
Cal quemada	(CaO quemada)	10,08%
CO <sub>2</sub> residual	(CO <sub>2</sub> )	1,50%
Impurezas		+ 10,08%
Total		100,00%

Cabe mencionar que la cal cruda no es reactiva al agua y se hidroliza muy poco. Sin embargo, en ambiente ácido su capacidad neutralizadora es alta, por lo que, dependiendo del uso de la cal el aporte de basicidad por el material crudo puede ser en algunos casos nulo y en otros muy importante ya que aporta basicidad si el sistema dispone de materiales, minerales o aguas con pH ácido. Por otro lado, la cal quemada se hidroliza formando finalmente, entre otros, hidróxido de calcio, el cual tiene la solubilidad indicada en la Tabla 4.

Las impurezas involucradas pueden otorgar alcalinidad siempre y cuando éstas sean compuestos que posean elementos alcalinos o alcalino térreos que sean capaces de hidrolizarse en agua. Entre los primeros tenemos, entre otros, el sodio y potasio y en el segundo, entre otros, el magnesio.

El análisis de CaO útil mediante la aplicación de la norma ASTM C25-2006, es una buena fuente para conocer por diferencia el contenido de CaO requemada.

La experiencia ha demostrado que para este tipo de materia prima, con calcinación en un horno industrial y una alta eficiencia, bajo  $\text{CO}_2$  residual y bajo CaO requemado, no se puede lograr una cal con un contenido superior al 79,5% de CaO libre.

### **6.1.3. Factores que afectan la calidad del CaO industrial**

Como se ha mencionado anteriormente, el carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ , se calienta en los hornos rotatorios o verticales para expulsar el  $\text{CO}_2$  de la caliza ( $\text{CaCO}_3$  más impurezas) y producir óxido de calcio CaO disponible. Este proceso es llamado calcinación.

Las condiciones de calcinación afectan significativamente la calidad de cal viva, CaO disponible, que resulta de este proceso. Los siguientes factores son los más determinantes de la calidad del CaO total o disponible:

6.1.3.1. Composición química de caliza.

6.1.3.2. Temperatura del horno durante el período de calcinación

6.1.3.3. Tiempo de residencia de la cal en el interior del horno

6.1.3.4. Concentración del anhídrido carbónico en la atmósfera del horno. ( $\text{CO}_2$  residual)

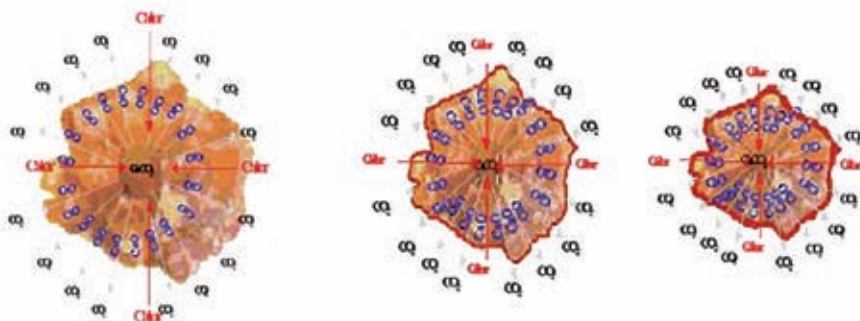
#### **6.1.3.1. Composición química de la caliza, $\text{CaCO}_3$ más impurezas**

La composición química de la caliza, carbonato de calcio con impurezas, no se puede controlar sin un impacto del mayor costo en la fabricación de cal viva, por consiguiente, se aceptan generalmente variaciones. Hay que calentar uniformemente la caliza en el horno, por eso se debe controlar continuamente la temperatura de calcinación, el tamaño de partícula debe ser relativamente uniforme. Hay que evitar largos tiempo de residencia en el horno.

El tamaño de partícula de caliza debe ser pequeño, típicamente alrededor de 1,5". Sin embargo, debido a la naturaleza del funcionamiento del chancado, en realidad hay un rango en tamaño que va desde 1,5" a 2". En el caso de INACESA, la caliza para producir cal se encuentra en dos rangos de 6 mm a 15 mm y de 15 mm a 50 mm.

Aunque el tiempo de residencia y la temperatura en el horno son constantes, la penetración del calor en las partículas de caliza es diferente, debido a la variación del tamaño de ésta. Como se indicó en la Figura 20 y ahora se muestra en la Figura 21, con un tamaño de mineral más grande, la primera partícula de la izquierda en la Figura 21, el calor no penetra totalmente al centro, por consiguiente el centro de estos minerales queda crudo, como carbonato de

calcio, mientras se convierte el exterior a  $\text{CaO}$ ; estos núcleos o centros son llamados “arena” en la lechada de cal. Para minerales de tamaño intermedio, la penetración del calor es algo más completo y se convierte todo el mineral en  $\text{CaO}$ , generándose una capa exterior de  $\text{CaO}$  enlazado a la sílice y alúmina presente en la materia prima. Para las partículas más pequeñas, el calor ingresa rápidamente al centro y se sobrecalienta la superficie, formando una capa externa, una cáscara exterior más gruesa y algo dura, donde el agua le cuesta penetrar, por consiguiente, según el equipo utilizado para la preparación de la lechada de cal, se puede retardar o prevenir el proceso de apagado,



**Figura 21: Piedras calizas, de diferente tamaño y geometría, sometidas a temperatura y tiempo de residencia constante en un horno durante la calcinación, en el centro de la partícula queda material crudo y en la superficie el material requemado.**

Así pues, según la Figura 21, los productos obtenidos con las partículas de tamaño grandes y medio son altamente reactivas (cal viva quemado suave) y las partículas más pequeñas, cal viva quemado duro, generalmente son de reactividad media e incluso podrían alcanzar reactividad baja si son calcinadas a “muerte”.

Reactividad se refiere en este caso al tiempo que demora una disolución de cal con una concentración al 25%, en peso, en alcanzar una diferencia de temperatura de  $40^{\circ}$  Celsius, ensayo utilizado para diseñar o elegir el equipo hidratador más adecuado con el fin de lograr como producto un polvo fino y seco. No es una variable útil para medir la capacidad alcalinizante de la cal.

En el proceso de preparación de lechada cuando se utiliza un molino vertical (de torre) la capa dura que se forma en la superficie de la partícula no es de importancia relevante, dado que las bolas al interior de éste, la fracturan y facilitan el ingreso de agua para su hidratación, es más, la capa dura que corresponde a la formación de silicatos y aluminatos cálcicos en su hidratación genera grupos hidroxilos, adquiriendo la lechada -que se produce sólo con esta capa- el mismo pH del  $\text{Ca(OH)}_2$ .

### 6.1.3.2. Temperatura del horno

La temperatura del horno afecta la calidad del CaO producido y por ende al hidróxido resultante desde el apagado de dicha cal viva. Tamaños de partícula muy pequeños con gran superficie específica, es el producto final más deseable de óxido del calcio. En la Figura 22 se muestra el impacto de la temperatura del horno sobre el tamaño de partícula, expresada como área superficial de las partículas hidratadas de CaO, como un polvo fino y seco.

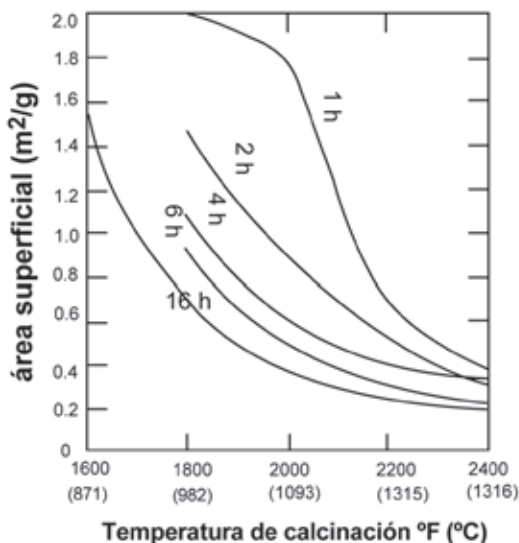


Figura 22: Relación entre el área superficial y la temperatura de calcinación

En la operación industrial, el control de temperatura no se puede realizar directamente en la partícula, como tampoco es factible contar con un tamaño mono granular y una forma geométrica única de ésta, por lo que el tiempo de calcinación y el control en forma indirecta de la temperatura: son las variables que permiten de algún modo tener un control sobre una calcinación adecuada, para que el efecto sobre el área superficial sea menor.

J.A.H. Oates en su libro referido a cales y calizas, en el capítulo donde explica la calcinación, hace notar que en el caso de la cal viva calcítica, las variables que afectan el grado de disociación son:

- Características de la caliza
- Distribución de tamaño de las partículas
- Forma de las partículas
- El perfil de temperatura en la zona de calcinación y
- La velocidad de intercambio del calor entre los gases y las partículas

Si se observa al microscopio un grano de cal quemada blanda, se verá que éste presenta una gran cantidad de pequeñas grietas, tipo pelo, por donde ha escapado el  $\text{CO}_2$  de la caliza durante el proceso de calcinación. Cuando esta cal, es expuesta al agua, el agua penetra por esas grietas y las partículas de cal crujen, llenándose las cavidades con agua. El hidratado o apagado se produce rápidamente, libera mucha energía y bastante calor. Este calor hierve el agua y genera vapores, los cuales hacen que las partículas estallen, permitiendo que las superficies internas sean expuestas al agua y el proceso sea más amplio. Este proceso continuará hasta que el apagado o hidratado de toda la cal se haya completado.

#### 6.1.3.3. Tiempo de residencia

Durante el proceso de calcinación, el tiempo de residencia de la caliza,  $\text{CaCO}_3$  más impurezas, en el horno es muy crítico. Es importante que el tiempo de residencia sea lo más corto posible. Sin embargo, se debe dar margen para que el calor penetre las partículas de caliza por suficiente tiempo y conduzca el  $\text{CO}_2$  fuera de ellas. La temperatura y el tiempo son variables de control de la calcinación, es decir, hay calcinaciones con baja temperatura y alto tiempo de residencia, o, con alta temperatura y bajo tiempo de residencia, siendo opción de cada fabricante elegir lo que satisface su sistema.

#### 6.1.3.4. Atmósfera del horno

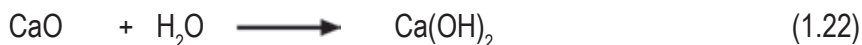
Además de la temperatura del horno y del tiempo de residencia, la atmósfera del horno afecta la calidad del producto obtenido,  $\text{CaO}$  disponible. Así como aumenta la temperatura en el  $\text{CaCO}_3$  y el gas de  $\text{CO}_2$  se suelta desde la caliza, para producir  $\text{CaO}$  disponible, se debe entregar al  $\text{CO}_2$  la salida o escape necesario del horno hacia afuera. El  $\text{CaO}$  disponible tiene la afinidad de absorber humedad y  $\text{CO}_2$  para convertirse en  $\text{CaCO}_3$ . El efecto de esta conversión es más pronunciado en las partículas pequeñas de  $\text{CaO}$  debido a la mayor superficie específica de éstas.

### 6.2. Cal apagada o hidratada

La cal apagada se forma mezclando cal viva más agua suficiente para lograr una hidratación adecuada, obteniendo un polvo -muy fino- hidratado y seco. Existen tres tipos:

#### 6.2.1. Cal apagada de alto calcio

La cal apagada de alto calcio tiene una solubilidad de 1,85 g/l a  $0^\circ\text{C}$  y de 0,71 g/l a  $100^\circ\text{C}$ . Se obtiene de acuerdo a la siguiente reacción:



Esta reacción de hidratación, produce 15.300 calorías/mol, siendo su cinética incrementada hasta aproximadamente los 100 °C. De 100 °C hasta alrededor de 540 °C la velocidad de reacción disminuye y sobre los 549 °C la reacción se invierte.

De acuerdo a estos antecedentes y experiencias realizadas a escala de laboratorio, para lograr en faena -a cielo abierto- esta reacción en forma eficiente, y lograr un polvo fino y seco, es recomendable utilizar alrededor de un 50% más de agua que la cantidad teórica estequiométrica.

### 6.2.2. Cal apagada dolomítica normal

Se obtiene por hidratación bajo condiciones ambientales normales, resultando la hidratación del óxido de calcio, formando el hidróxido de éste y, quedando inalterable el óxido de magnesio, según la siguiente reacción:



### 6.2.3. Cal apagada dolomítica especial

La cal apagada dolomítica especial se obtiene hidratando los óxidos de la cal viva dolomítica, bajo condiciones especiales de presión y temperatura, para lograr la hidratación tanto del calcio como del magnesio, mediante la reacción química siguiente:



## 6.3. Cal Apagada Hidráulica

La cal apagada hidráulica es una mezcla de cal apagada de alto calcio con puzolana, arcilla, ceniza volante, o cualquier material que contenga alúmina y sílice libre activa, con el fin de que en la hidratación se generen en forma natural los silicatos y aluminatos cálcicos, que son los que proporcionan las propiedades de conglomerante hidráulico, o sea, que sean capaces de endurecerse tanto en el aire como bajo agua.

Esta reacción de endurecimiento, que se produce al mezclar la cal con este tipo de materiales, se debe a que en esta combinación, la cal actúa como un catalizador, ya que el abatimiento de la alúmina desplaza los iones  $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  -de estos materiales arcillosos- acelerando la reacción entre el calcio y el óxido de silicio libre, permitiendo el enlace químico para formar los silicatos y posible aluminatos cálcicos. Todo esto, produce un crecimiento cristalino de las partículas finas y coloidales, cubriendo las partículas gruesas, aglutinándolas entre sí, actuando como un ligante

## 6.4. Cal Aérea

La cal aérea es la cal viva hidratada a la intemperie, donde se obtiene, generalmente, una mezcla de cal viva, cal apagada y cal recarbonatada.

## 6.5. Cal Refractaria

La cal refractaria es usualmente cal viva dolomítica, la que ha sido extremadamente calcinada y posee una pequeña o ninguna tendencia de convertirse en hidróxido.

## 6.6 Otras Denominaciones

Las normas norteamericanas A.S.T.M. denominan la cal de acuerdo a la utilización que se le otorgue, ya que en cada uso las exigencias técnicas a cumplir son diferentes. En la Tabla 7 se mencionan algunas de ellas.

NORMA ASTM	UTILIZACIÓN
C5-79	"Cal viva para propósitos estructurales"
C45-25 (R-79)	"Cal viva y cal hidratada para el tratamiento de desechos de papel"
C46-62 (R-79)	"Cal viva y calizas para fabricación de pulpas de sulfito"
C49-57 (R79)	"Cal viva y cal hidratada para fabricación de ladrillos silíceos."
C53-63 (R76)	"Cal viva y cal hidrata para el tratamiento de agua."
C141-67 (R-78)	"Cal hidráulica hidratada para propósitos estructurales"
C206-79	"Cal hidratada de terminación."
C207-79	"Cal hidratada para albañilería."
C258-52 (R-79)	"Cal viva para fabricar carburo de calcio."
C259-52 (R-79)	"Cal hidratada para fabricar grasas."
C400-64 (R-81)	"Cal viva y cal hidratada para neutralizar desperdicios ácidos."
C415-72 (R-76)	"Cal viva y cal hidratada para productos de silicatos"
C433-63 (R-76)	"Cal viva y cal hidratada para la fabricación de hipoclorito"
C602-69 (R-80)	"Cal para encalado agrícola."
C706-72 (R-81)	"Calizas para usar como alimento animal."
C737-73 (R-78)	"Calizas para despolvamiento de minas de carbón."
C821-78	"Cal para uso con puzolanas."
C826-75	"Productos de cal y caliza para tratamiento de desechos industriales."
C911-79	"Cal viva, cal hidratada y caliza para usos químicos."

Tabla 7: Algunas normas A.S.T.M para la cal (Fuente: American National Standard ASTM)

En el caso de las normas IS (India); IRAM ( Argentina); AFNOR (Francia); DIN (Alemania), la cal es denominada de acuerdo al producto obtenido y normalizada para su uso en la construcción, por ejemplo: cal al aire blanca; cal al aire dolomítica; cal al agua; cal hidráulica; cal súper hidráulica; cal blanca fina; cal blanca granulada; cal en pasta; entre otras.

En Chile no existen normas que regulen los distintos tipos de cal. Sólo la Norma Chilena Oficial NCh 1928 Of. 1986, sobre albañilería armada, menciona el uso de cal hidráulica y cal aérea con algunos requisitos a cumplir. Valores que se repiten en la norma, NCh 2256 C94 denominada Morteros - Requisitos Generales. Cabe señalar que el contenido de la suma entre el CaO y MgO exigido para la cal aérea, si está referido al óxido de calcio libre, no puede ser cumplido por ningún fabricante de cal de los productores chilenos, porque las materias primas que existen en nuestro país, no permiten alcanzar tal valor.

## 7. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LA CAL

Los antecedentes físico-químicos que se presentan en las Tablas 8 y 9, corresponden a datos teóricos de los distintos tipos de cal que existen, siendo las otras definiciones dichas anteriormente, una derivación de estas mismas.

En Chile los productores industriales privados de cal, son INACESA, SOPROCAL, y CPCAL, siendo el último principalmente un fabricante de cal para uso exclusivo en el área de la construcción y los dos primeros, INACESA y SOPROCOAL, los abastecedores del mercado nacional con cales calcíticas que cumplen las características físico-químicas, descritas en las Tablas 10, 11 y 12.

Tipos de Cal	Unidad	Calcítica	Dolomítica	Dolomítica	Magnesiana
			N	S	
Nombre químico		Hidróxido de Ca	Hidróxido de Ca-Oxido de Mg	Hidróxido de Ca-Oxido de Mg	Hidróxido de Mg
Formula química		Ca (OH) <sub>2</sub>	Ca (OH) <sub>2</sub> •MgO	Ca (OH) <sub>2</sub> •Mg(OH) <sub>2</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>
Peso molecular	g/mol	74,096	114,4	132,4	58,336
Punto descompresión	°C	580			345
Indice de refracción		1,574 y 1,545			1,559 y 1,580
Calor de solución	kcal	+ 2,79			
Formación cristalina		Hexagonal			Hexagonal
Solubilidad a 0°C	g/l	1,85			0,0098
Solubilidad a 100°C	g/l	0,71			0,0042
Peso específico		2,3-2,4	2,7-2,9	2,4-2,6	2,4
Densidad en granza	g/l	400-560	400-560	480-640	
Calor específico a 10°F	BTU/lb	0,29	0,29	0,29	
Ángulo de reposo		15º-80	15º-80	15º-80	70º
		Generalmente 70º			
Calor de hidratación	cal/mol	15.3			8.000 a 10.000
Calor Formación ΔH a 25°C	kcal/mol	-235,58			
Energía Libre ΔG 25°C	kcal/mol	-213,9			
Porcentaje de CaO puro	%	75,69	49,01	42,35	
Porcentaje de MgO puro	%		35,24	30,44	69,12
Porcentaje de agua	%	24,31	15,75	27,21	30,88

Tabla 8: Características físico-químicas de los distintos tipos de cal apagada (Fuente: National Lime Association)

<b>Tipos de Cal</b>	<b>Unidad</b>	<b>Calcítica</b>	<b>Dolomítica</b>	<b>Magnesiana</b>
Nombre químico		Óxido de Ca	Óxido doble Ca-Mg	Óxido de Mg
Formula química		CaO	CaO•MgO	MgO
Peso molecular	g/mol	56,08	96,40	40,32
Punto de fusión	°C	2.57		2.80
Índice de refracción		1.838		1.736
Calor de solución	kcal.	+18,33		
Formación cristalina		Cúbica		Cúbica
Solubilidad a 0°C	g/l	1,40		0,0068
Solubilidad a 100°C	g/l	0,54		0,0030
Peso específico		3,2-3-4	3,2-3-4	3,65
Densidad en grana	g/l	881-961	881-961	
Calor específico a 100°F	BTU/lb	0,19	0,21	
Ángulo de reposo			50-55°	50-55°
Calor de hidratación	cal/mol	43,3		28,9
Calor Formación $\Delta H$ a 25°C	kcal/mol	-151,7		-235,58
Energía Libre $\Delta G$ 25°C	kcal/mol	-144,3		
Porcentaje de CaO puro	%	100	58,17	
Porcentaje de MgO puro	%		41,83	100

**Tabla 9: Características físico-químicas de los distintos tipos de cal viva** (Fuente: National Lime Association)

PRODUCTOS		CAL VIVA		CAL
		GRANULADA	MOLIDA	HIDRATADA
		Calcítica	Calcítica	Calcítica
<b>Químicas:</b>				
CaO libre	%	75,0 - 79,0	75,0 - 79,0	50 - 65
CaO disponible o total	%	84,0 - 89,0	84,0 - 89,0	65,4 - 68,8
CaO crudo	%	0,5 - 1,5	0,5 - 2,0	
CaO combinado	%	6,0 - 13,0	6,0 - 13,0	
Valor alcalinizante	%	84,0 - 88,0	84,0 - 88,0	18,8 - 21,7
Pérdida al fuego	%	0,4 - 1,4	0,4 - 1,5	0,3 - 2,2
Humedad	%	ND	ND	%
Cinética	minutos	> 5	> 5	> 1
Sólidos de la lechada	%	10 - 15	10 - 15	10 - 15
Envejecimiento	horas	24	18	0,5
recomendado para la lechada preparada con esta cal				
<b>Físicas:</b>				
Granulometrías				
Retenido en malla				
3/4" (19,05 mm)	%	0 - 5		
1/2" (12,79 mm)	%	0 - 35		
200 (0,075 mm)	%		20	
Densidad suelta	t/m <sup>3</sup>	0,9 - 1,1	0,80	0,65
Densidad compactada	t/m <sup>3</sup>	1,0 - 1,2	1,00	0,75
Ángulo de reposo	Grados	50 - 55	> 60	> 70
Velocidad mínimo del flujo de esta lechada.	m/s	> 0,77	> 0,77	> 0,77

Tabla 10: Características físico-químicas de las cales producidas por INACESA (Fuente: Industria Nacional de Cemento S. A.)

PRODUCTOS		CAL VIVA				
		GRANULADA		MOLIDA		
Tipos de cal		Calcítica		Calcítica		
		2/80	2/88	3/60	3/80	3/88
Químicas:	Unidad					
CaO libre	%	77,0 - 81,6	86,0 - 90,4	60-62	77,0 - 81,5	86,0 - 90,0
CaO disponible o combinado	%	87,0 - 89,0	96,0 - 98,2	75-77,1	88,2 - 90,4	93,0 - 95,4
CaO crudo	%	2,0 - 3,5	1,9 - 4,0		2,1 - 3,7	2,0 - 4,2
CaO combinado	%	3,0 - 6,0	2,5 - 3,5		3,0 - 6,0	2,5 - 3,5
Valor alcalinizante	%	80,0 - 87,6	88,5 - 93,9		80,0 - 87,5	88,5 - 93,9
Pérdida al fuego	%	1,2 - 40	1,2 - 3,5	1,0-4,1	1,2 - 40	1,2 - 3,5
Cinética	minutos	> 3		> 7	> 5	
Sólidos de la lechada	%	10 -15				
Tiempo envejecimiento de la lechada preparada con esta cal	horas	24	24		18	18
Físicas:						
Granulometrías:						
+ 15 mm	%	< 4,8	0		-	-
+ 08 mm	%	< 20,0	0		-	-
+ 02 mm	%	< 12,1	0		-	-
+ malla 50	%	< 9,2	< 15,6		< 0,5	< 0,5
+ malla 100	%	< 7,1	< 46,8		< 2,5	< 2,5
+ malla 200	%	< 0,5	< 6,1		< 5,5	< 3,5
+ malla 325	%	< 0,9	< 1,5		< 11,5	< 11,0
Densidad suelta	t/mt <sup>3</sup>	0,9 - 1,1	0,9 - 1,1		0,8 - 1,0	0,8 - 1,0

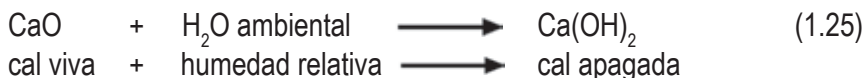
Tabla 11: Características físico-químicas de la cal viva producida por SOPROCAL (Fuente: SOPROCAL, Calerías e Industrias S. A.)

PRODUCTOS		CALES HIDRATADAS	
Tipos de cal		Calcítica	Calcítica
Químicas:	Unidad	Superfina	Espuma
Ca(OH) <sub>2</sub> libre ASTM	%	77,3 - 81,8	88,0 - 92,4
CaO total complex	%	69,2 - 71,8	73,2 - 75,3
CaO crudo	%	2,0 - 3,8	2,1 - 4,2
CaO combinado	%	1,8 - 4,0	1,5 - 3,5
Físicas:	Unidad	Superfina	Espuma
Granulometría			
+ Malla 50	%	< 0,2	< 0,2
+ Malla 100	%	< 1,0	< 1,0
+ Malla 200	%	< 2,5	< 2,5
+ Malla 325	%	< 5,5	< 6,5
Densidad suelta	t/m <sup>3</sup>	0,4 - 0,5	0,4 - 4,5

Tabla 12: Características físico-químicas de la cal hidratada producida por SOPROCAL (Fuente: SOPROCAL, Calerías e Industrias S. A.)

## 8. ESTABILIDAD DE LA CAL EN EL TIEMPO

La cal viva es un material ávido de agua (anhidro), y tiene una gran afinidad por ella, por lo que la absorbe a una velocidad bastante alta, expandiendo su tamaño 2,5 veces, generándose el rompimiento de la partícula en varias partículas más pequeñas en un tiempo que depende del grado de reactividad de ésta, por lo que si no se protege de la humedad ambiental, ocurre la siguiente reacción química:



Mientras más pequeño el grano de partícula, más completa y rápida es la hidratación, obteniéndose un polvo que aumenta su finura de acuerdo al tamaño previo a la hidratación.

La presencia de agua o vapor favorece la reacción, formando un hidrato que fácilmente se puede transformar en carbonato, esto, debido a que la presión de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera circundante es mayor que la presión de disociación del carbonato, ocurriendo la siguiente reacción:



Seguramente este es el motivo para que no se encuentre cal viva ni cal apagada en forma natural. Sin embargo, es común encontrar en la bibliografía y en algunas faenas mineras llamarle cal a la caliza.

La reactividad de la cal en agua, es un ensayo que sirve para medir la liberación o descarga del calor de hidratación, esto es, mide la cinética necesaria para hidratarla. También sirve para medir la velocidad en que una suspensión acuosa (lechada) produce iones hidroxilos al ser neutralizada con ácido clorhídrico a pH 9,2. En el primer caso, se utiliza para dimensionar los equipos hidratadores que permiten obtener, a partir de la cal viva, un polvo fino y seco de cal hidratada, y la segunda para conocer la capacidad de la cal viva para neutralizar una solución ácida.

Existen varias técnicas similares y que son aceptadas en la industria de la cal; para medir la hidratación. Varias miden la diferencia de la temperatura que se produce en un tiempo definido, al preparar una lechada a partir de cal viva y que se mantiene con agitación constante en un recipiente adiabático, térmicamente aislado; tanto las cantidades de cal viva, de agua y de la temperatura inicial, varían (como lo muestra la tabla 13) por lo que, los resultados obtenidos no afectan al valor final para su clasificación posterior en la norma que corresponda.

NORMAS	Temperatura del agua °C	Cantidad de Cal g	Cantidad de agua cm <sup>3</sup>
ASTM C-110 (U.S.A.)	25	100	400
AWWA (American Water Wks Assoc.)	25	100	400
NKL (valor R) Asoc. Alemana de Cal	20	150	600

**Tabla 13: Normas y requisitos para realizar el ensayo de reactividad de la cal**

Los productores europeos de cal aún utilizan frecuentemente el análisis de reactividad llamado “Titulación” (“Grobkorn-Titration”). En esta técnica se mide la cantidad de ácido clorhídrico que reacciona, bajo condiciones controladas, con una cantidad predefinida de cal viva; los resultados de este análisis se expresan normalmente en mililitros de ácido clorhídrico 4N (una solución de ácido de concentración determinada) consumidos por la cal en un período de 3; 5; y 10 minutos.

Para la clasificación: el consumo de ácido clorhídrico depende del tiempo que demora en lograr la neutralización. Es decir, el consumo de ácido clorhídrico a los tiempos de 3; 5 y 10 minutos.

La reactividad química, según las Normas IRAM-IAS U500-89 de Argentina, consiste en conocer el volumen de ácido clorhídrico, 4N, consumido a los 5 minutos, por 10 gramos de cal mezclada en 400 cm<sup>3</sup>, de agua a 40°C, manteniéndola con agitación constante a 900 rpm., utilizando fenolftaleína como indicador. La velocidad de agregado del ácido clorhídrico se realiza de tal manera que el indicador siempre se encuentre en su punto de cambio de color.

En general, la reactividad, puede verse afectada tanto por la densidad aparente de la cal como por las impurezas que pueda contener el agua utilizada en el ensayo. Del mismo modo puede ocurrir por la absorción de humedad y/o anhídrido carbónico desde la atmósfera durante el almacenamiento o preparación de las muestras, por ello el cuidado de esta operación debe ser extremo.

Cales vivas con pequeñas cantidades de apagado aéreo (cal viva expuesta al ambiente) puede reducir significativamente la reactividad. Hay pruebas que muestran que 1,5% de agua absorbida o combinada, acompañada con una pequeña cantidad de anhídrido carbónico, puede reducir en unos 10° Celsius la reactividad. Como regla general, muestras de cal viva que contengan 1,0 % o más, de agua absorbida o combinada, no puede ser sometida a ensayo o análisis de reactividad.

En ausencia de cal apagada o hidratada, la cal viva sólo reacciona con el anhídrido carbónico a temperaturas por sobre los 300°C y bajo los 800 °C. Esta reacción puede ocurrir -bajo condiciones anormales- en la zona de enfriamiento de los hornos de cal, el resultado de la carbonatación en la superficie de los poros de la cal viva, puede otorgar bajas reactividades para una cal de igual densidad aparente.

La reactividad de la cal en agua, para la preparación de lechadas, no tiene importancia alguna, sobre todo en faenas donde la lechada de cal se consume varias horas después de ser preparada. Esta característica, no tiene participación en la capacidad alcalinizante de la cal, sólo es importante para cuando se desea hidratar con el fin de obtener un polvo fino seco.

La Figura 23 muestra los resultados de reactividad, según norma ASTM C-110, para tres muestras de cal con distinto comportamiento en la reacción con el agua, pero con igual valor de alcalinidad en la solución formada, pH 12,6.

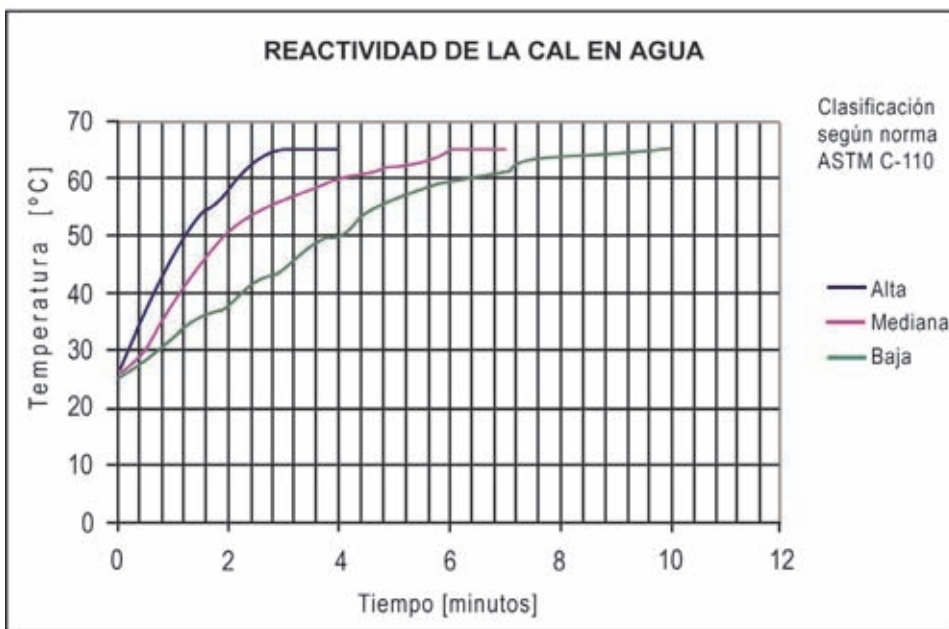


Figura 23: Gráfico de reactividad en agua

## 9. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

### 9.1. Disposiciones Legales

El Decreto Supremo N° 745 del Ministerio de Salud, sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en lugares de trabajo, publicado el 8 de junio de 1993, define una concentración de  $1,6 \text{ mg/m}^3$ , como el límite máximo ponderado permisible para el óxido de calcio promediado en un turno de 8 horas.

La Norma Chilena NCh 382 oficializada el 2004 establece una clasificación general de las sustancias peligrosas en Clase y División, y presenta dos listados de las sustancias peligrosas. En ambos aparece mencionado el óxido calcico (cal) clasificado de acuerdo al riesgo más significativo que presenta en el transporte terrestre en Chile, en su manipulación y almacenamiento, Clase o División 8, Grupo de embalaje / envase III y número de guía GRE 157. Sólo en el listado de sustancias ordenadas alfabéticamente indica que las disposiciones especiales corresponden al N° 106, el que en el apéndice E de la misma norma no aparece definido. En las versiones anteriores esta disposición estaba referida a que “Esta sustancia no esta clasificada como peligrosa, excepto para el caso de transporte aéreo”, lo que ahora ha sido eliminado.

Por otro lado, en la Norma Chilena NCh 2120/8, oficializada en el 2004, también está la cal en el listado de las sustancias peligrosas de la Clase 8, definida en la NCh 382 y señala que la norma se aplica al transporte terrestre en territorio nacional, almacenamiento y manipulación asociados al transporte de todas las sustancias corrosivas de la Clase 8 que aparecen en el listado, indicado anteriormente, con la finalidad de propender a la seguridad personal, la seguridad colectiva, la seguridad de la propiedad y del medio ambiente

Según esta norma el óxido cálcico (denominación química) o la cal (denominación comercial), tiene el número de referencia de Naciones Unidas de 1910, la clase de riesgo y la división dentro de la clase es la N° 8, “Sustancias corrosivas”. Para el grupo de embalaje/envasado de la sustancia, en función de su grado de peligrosidad, la clasifica en el grupo III: “Sustancia y preparados poco peligrosos” que corresponde a dos tipos de observación:

- a. Sustancias que causan la destrucción de un tejido cutáneo intacto en todo su espesor antes que transcurra un período de observación menor o igual a 14 días contados tras un período de exposición mayor de 1 hora pero menor o igual a 4 horas.
- b. Sustancias respecto de las cuales se consideran que no causan la destrucción de un tejido cutáneo intacto en todo su espesor, pero que al ser aplicadas sobre superficies de acero o de aluminio, a una temperatura de ensayo de  $55^\circ\text{C}$ , causan una corrosión de más de 6,25 mm por año. Para los ensayos con acero, el metal utilizado debe ser del

tipo P 325 (ver ISO 9328-2) o de un tipo análogo, y para los ensayos con aluminio de los tipos no revestidos 7075-T6 o AZ5GU-T6. Se indica un ensayo aceptable en ASTM G31-72 (prorrogada en 1990)

Por lo tanto, la cal es sustancia peligrosa para el transporte terrestre, y debe cumplir con las exigencias de la normativa nacional.

## **9.2. Peligros y Riesgos para la Salud**

Los peligros para la salud se refieren a que puede afectar al organismo por las vías de inhalación, del contacto con la piel o los ojos y por la ingestión.

Los riesgos a la exposición de corto plazo son de:

- Irritación a los ojos, nariz, garganta y piel, debido a la alcalinidad de la cal. Sin embargo, la deshidratación y los efectos térmicos pueden ser factores constituyentes de quemaduras intensas, bronquitis y neumonía.

Los riesgos a la exposición de largo plazo o repetitivas veces son de:

- Dermatitis
- Úlceras
- Perforaciones al tabique nasal.

## **9.3. Toxicidad**

La cal es atóxica y no existen antecedentes que indiquen lo contrario, no obstante es necesario usar equipos de protección adecuados y proveer de ventilación donde sea necesario.

Por lo tanto, en el manejo de la cal, especialmente cuando se trata de cal viva, hay que evitar el contacto con zonas húmedas del cuerpo, sobre todo las articulaciones, cuello, ojos, vías respiratorias y otras, ya que al tomar ésta contacto con la humedad, se produce la hidratación y el calor liberado debido a esta reacción, produce quemaduras químicas de distintos grados, dependiendo del tiempo de exposición de la zona afectada y de la cantidad y tipo de cal involucrada.

## **9.4. Protección**

En lugares donde exista alta concentración de polvo, como las zonas de carga y descarga, alimentadores abiertos, polvo en el ambiente y zona de manipulación, se debe usar:

- Cremas protectora aplicada al cuello, puños, tobillos, cintura y manos. Esta crema debe

lavarse fácilmente, como la gelatina de aceite mineral.

- Respirador adecuado.
- Protección visual. Mono visor de una pieza de cierre hermético.
- Capucha con suministro de aire en lugares de trabajo fijo.
- Pantalón que descienda hasta cubrir la bota.
- Camisa manga larga de exudación abotonada en cuerpo y cuello.
- Guantes.

En general la ropa de seguridad que se utiliza no debe ser ceñida al cuello, puños, cintura y tobillo, ya que el roce resultante con la cal puede causar irritaciones en la piel.

### **9.5. Higiene**

Las recomendaciones de higiene en la utilización de la cal en faena son:

- No usar lentes de contacto.
- No fumar ni comer.
- Lavarse las manos para manipular alimento y/o usar instalaciones sanitarias.
- Tomar una ducha al término de la jornada usando un jabón suave.
- Lavar la ropa si se encuentra saturada de polvo (recomendable usar ropa limpia para cada turno).
- Mantener llaves de agua cerca del lugar donde se manipule la cal y al sentir una ligera picazón, lavarse con abundante agua corriente.

### **9.6. Almacenamiento**

La cal no es combustible cuando se mezcla con agua, no obstante, desprende un calor considerable cuando entra en contacto con ella, o con ácidos u otras sustancias químicas que contengan agua de cristalización.

El calor resultante de la hidratación puede ser suficiente como para encender materiales combustibles cercanos.

En el almacenamiento, debido a que la cal es un material altamente higroscópico como se mencionó en el Punto 8 y lo muestra la reacción (1.22), es conveniente mantener un stock

pequeño y en zonas libres de humedad, en lo posible en envases impermeables y ojalá sobre madera a una distancia de al menos 10 cm del suelo, para evitar contacto con la humedad del piso.

### **9.7. Derrames**

En casos de peligro de derrame de cal, se debe restringir el acceso de personas que no usen lo equipos y la ropa de protección adecuada hasta completar la limpieza.

En los sectores de derrames se debe:

- Ventilar la zona
- Recoger el material derramado
- Depositarlo en tambores herméticamente cerrados, para recuperarlo o vaciarlos en un relleno de tierra sanitario adecuado.

Respetar y seguir las instrucciones que se entregan en el Anexo 1 Punto 21.2 referido al plan de contingencia frente a derrames.

### **9.8 Hoja de Seguridad de la Cal**

En el Anexo N° 1, Punto 1.1, se muestra una hoja de seguridad típica, para el manejo seguro de la cal

## **10. APLICACIONES DE LA CAL EN DIVERSOS PROCESOS**

La cal viva, tomando las precauciones en el manejo de la misma con respecto a evitar accidentes, puede ser utilizada en todos los procesos químicos, mineros, metalúrgicos e industriales, en que ésta es requerida, ya sea como cal viva granulada, cal viva molida, cal apagada, lechada de cal y otras formas pertinentes. Las diferencias en la aplicación de cada una de ellas, está en la forma de alimentación de la cal que cada proceso requiere, dado el aprovechamiento que de ella se desee obtener, en cuanto al contenido del valor alcalinizante que pueda desarrollar.

### **10.1. Cal Viva**

Granulada, se aplica en industrias o faenas en que se dispone de un tiempo de residencia, mayor que 12 minutos con el fin de que la cal logre una hidratación adecuada, para que posteriormente pueda liberar la totalidad de los grupos hidroxilos y de los iones calcio, entregar el calor de hidratación o para modificar la reología de una pulpa

Molida, a diferencia de la anterior, puede ser aplicada en industrias o faenas en que el tiempo de residencia en el proceso es menor que 12 minutos. También permite aprovechar el calor de hidratación de la misma y modificar la reología de una pulpa.

### **10.2. Cal Apagada o Hidratada**

Como en la cal apagada la hidratación ya ha ocurrido y sólo falta la liberación y combinación de los grupos hidroxilos y los cationes calcio, el tiempo de residencia que necesita es mucho menor que las dos mencionadas anteriormente. En cuanto a dosificación, se requiere agregar alrededor de un 32% más de material, puesto que su valor alcalinizante es degradado en la misma proporción de la cantidad de agua agregada, todo ello significa, manejar un stock mayor de material. Debe protegerse del  $\text{CO}_2$  ambiental para evitar su recarbonatación.

Es recomendable la aplicación de éste tipo de cal en faenas con limitaciones de aprovechamiento de agua.

### **10.3. Lechada de cal**

La forma más común y generalizada de agregar la cal en los diversos procesos en que se utiliza, es adicionarla en disolución, pulpa, o suspensión, donde es mezclada con agua. Esto, porque la hace substancialmente más lenta en sedimentar, en comparación con la cal adicionada directamente y es casi dos veces más rápida en reaccionar. Esta suspensión o lechada de cal, puede ser preparada a partir de cualquiera de los productos descritos en los párrafos anteriores, mezclándola con más de 10 partes de agua (que la cantidad teórica) para obtenerla con alto contenido de sólidos en suspensión, dado que esto ayuda a evitar los

distintos problemas de incrustación que se originan ya sea por una mala preparación como por un mal manejo de la lechada.

La preparación de lechada de cal es un proceso crítico y no basta que el operador conozca como manipular el equipo y el proceso donde se va aplicar la cal. El método y tipo de control utilizado para la preparación de ésta pueden afectar fuertemente la eficiencia del proceso posterior. Hay una serie de variables a considerar, las que se detallarán más adelante, a modo de ejemplo se puede mencionar que la calidad tanto del agua como de la cal viva o apagada ingresada al apagador, son importantes en la preparación de la lechada, así como también la temperatura a la cual se realiza la hidratación; una temperatura mayor o menor a la indicada por el fabricante de cal, genera tamaños de partículas con menor área superficial a exponer en aplicaciones donde se requiere mantenerla en estado sólido y no se busca alcanzar una disolución total de la cal. Una correcta instrumentación es esencial para controlar la temperatura correcta de apagado y mantener en un cierto rango la proporción de agua : cal.

#### **10.3.1.   Apreciación general del apagado de la cal y factores que afectan el proceso de preparación de lechada de cal**

Considerando que el apagado o hidratación de la cal es una parte integral de los sistemas de procesamiento de minerales u otros, en que se usa la cal como lechada, su elaboración influenciará en la eficiencia global del proceso, así como también, en el costo del funcionamiento de la planta de lechada.

En este punto es pertinente repasar los factores que afectan la eficiencia y elaboración de sistemas de hidratación o apagado de la cal, con el propósito de obtener como producto la lechada de cal. Del mismo modo se presentan directrices para el transporte hidráulico de la misma,.

Hay investigaciones sobre el apagado o hidratado de la cal realizadas, en años recientes. La mayor parte de estas investigaciones han sido auspiciadas o patrocinadas por la Asociación Nacional de Cal de Estados Unidos. La información presentada en esta parte, proviene de investigaciones hechas por investigadores universitarios en manejo, uso y aplicaciones de la cal en procesos mineros e industriales.

Como se mencionó anteriormente, la caliza es un mineral que se produce en forma natural, su composición química y características físicas van a variar no sólo por las distintas áreas del yacimiento, sino que dentro de las venas de la caliza en una misma área. Esta variación en los materiales crudos da por resultado una variación de calidad del producto obtenido, que es el óxido de calcio, el cual posteriormente se transforma a hidróxido de calcio en la preparación de lechada.

Hoy en día, la cal es el reactivo más importante usado en todo el mundo para el control de la polución, cuidado medioambiental, y en el procesamiento de minerales. En consecuencia, es indispensable el conocimiento en la manipulación y procesamiento de la cal, para la hidratación donde se desea obtener un polvo fino y seco o bien, para lograr un apagado de la cal que como producto conduzca a una suspensión acuosa de este reactivo.

### **10.3.2. Cal industrial y proceso de hidratación o apagado de la cal**

La cal es utilizada en una suspensión lechosa o pulpa de hidróxido de calcio en el control de la polución o en la descontaminación ambiental, en las industrias químicas y en el procesamiento de minerales, como la flotación de minerales sulfurados de cobre o la cianuración de minerales de oro y plata.

Si consideramos que en la reacción de hidratación 56 unidades de CaO más 18 unidades de H<sub>2</sub>O dan por resultado 74 unidades de Ca(OH)<sub>2</sub>, la proporción de hidróxido a CaO es  $74/56 = 1,32$ . Esto significa que 1 kg de CaO y 0,32 kg de agua producirán 1,32 kg de Ca(OH)<sub>2</sub>. Ésta es la cantidad mínima de agua requerida para la reacción química, en otras palabras el hidróxido de calcio contiene 75,7% CaO y 24,3% H<sub>2</sub>O.

El proceso de agregar agua al óxido del calcio, para producir hidróxido de calcio, es llamado proceso de hidratación o apagado de la cal. La hidratación del CaO, comercialmente llamado cal viva, es un proceso exotérmico, que libera una gran cantidad de calor, alrededor de 15.300 cal/g-mol a 25°C.

Este proceso de hidratación cuando se realiza con la cantidad justa y precisa de agua se llama “Hidratación Seca” En este caso el material del hidrato es un polvo muy fino y seco. Si se utiliza un exceso de agua, para la hidratación, el proceso es llamado “Apagado” En este caso el hidrato resultante está en una forma de suspensión, pulpa, o lechada, donde las partículas de hidróxido de calcio se encuentran dispersas en agua. Los fabricantes de cal generalmente usan el proceso de hidratación seco, para producir cal hidratada en polvo.

La lechada de cal, es la que se hace normalmente con un exceso considerable de agua, la que va desde 2 1/2 partes agua con 1 parte CaO (alrededor de 40% de sólidos) a 6 partes agua con 1 parte CaO (alrededor de 15% de sólidos).

### **10.3.3. Equipos que son utilizados para el proceso de preparación de lechada de cal**

No es la intención evaluar los equipos de producción de lechada descritos más adelante. La idea es mostrar los equipos disponibles para este proceso y hacer un detalle más preciso del más utilizado en la minería e industrias químicas. Hay básicamente tres tipos de preparadores de lechada de cal disponible en el mercado. Estos son:

#### 10.3.3.1 Apagadores cerrados para pulpa

#### 10.3.3.2 Apagadores para pasta

#### 10.3.3.3 Apagadores en molino de bolas

Un apagador debe mezclar la cantidad correcta de cal viva (CaO) y agua, para hidratar la cal viva, y separar o moler las impurezas “arena” de la pulpa resultante de hidróxido de calcio.

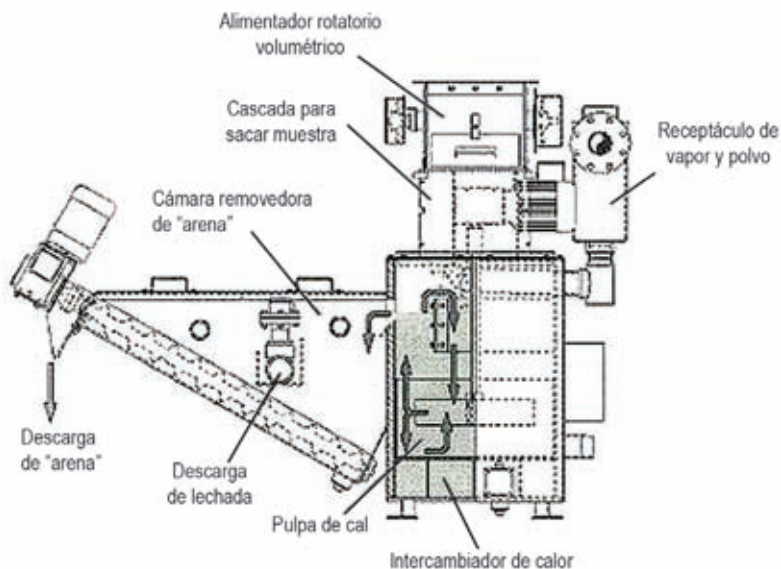
El término impurezas o “arena”, generalmente está referido a contenidos de CaO crudo, que corresponde al  $\text{CaCO}_3$  que no se calcinó; más la sílice, aluminio, hierro, sulfitos y otros presentes en la caliza y que no sufrieron cambios con el calor absorbido. No es el caso del CaO combinado con el silicio y la alúmina, que en el proceso de calcinación forma silicatos y aluminatos cálcicos, que tienen el mismo pH natural del CaO útil o disponible para hidratación, es decir 12,6, por lo que otorgan alcalinidad a cualquier proceso que requiera cal con este fin. Estos silicatos y aluminatos frente a una deficiente agitación en la preparación de lechada se agrupan cubriéndose con partículas de  $\text{Ca(OH)}_2$  formando partículas esféricas de color blanco.

#### 10.3.3.1 Apagadores cerrados para pulpa

Un apagador de pulpa generalmente, utiliza inicialmente una proporción de cal : agua de 1 a 3,3 ó 1 a 5 dependiendo de la fabricación del equipo, de la calidad del óxido de calcio, CaO y del agua.

Típicamente un apagador cerrado para pulpa, a veces llamado apagadores para pasta, contiene dos cámaras. La primera se denomina la cámara de apagado, donde la cal se mezcla con agua y la segunda usualmente se usa para remover la “arena”. Los flujos de la lechada de cal desde la primera a la segunda cámara son por gravedad. Se reduce la viscosidad de la pulpa en la segunda cámara por adición de agua fría, dejando que la “arena” más pesada sedimente al fondo de la segunda cámara, para posteriormente ser levantada y descargada con un tornillo. Esta “arena” eliminada es una pérdida importante de valor alcalinizante que poseen las cales, sin exagerar en las cales chilenas podría estimarse en una pérdida entre un 20 a 30% de alcalinidad.

La Figura 24 muestra un apagador semejante. Generalmente los apagadores cerrados para pulpa son diseñados para un tiempo de retención de 10 minutos a plena capacidad. Esto significa que una partícula de CaO desde el tiempo que entra al apagador hasta que termina en el eliminador de la “arena” permanece un promedio de 10 minutos.



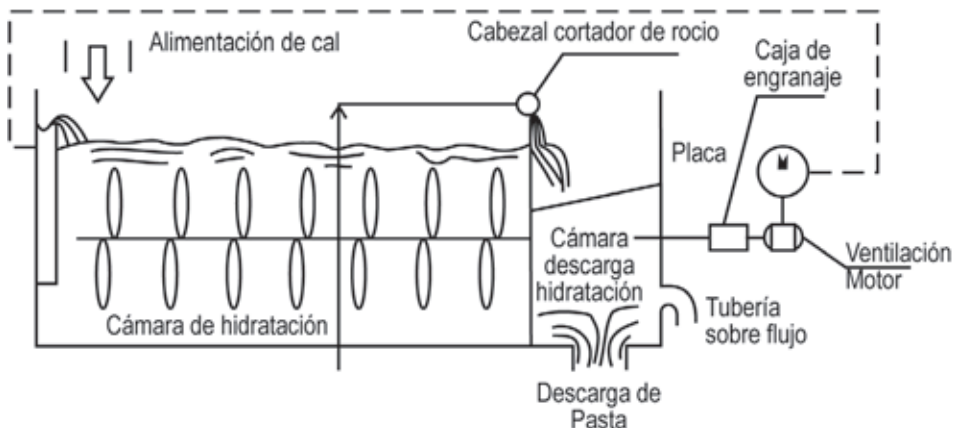
**Figura 24: Apagadores cerrados para pulpa**

El apagador cerrado para pulpa está disponible en una variedad de tamaños que va desde 68 kg/h a 15 t/h. Los apagadores cerrados de pulpa también están disponibles con harnero y vibradores internos, para la separación de la “arena”. Los apagadores cerrados para pulpa son los tipos más comunes en Europa y EE.UU., donde las cales alcanzan valores de CaO disponible cercanos al 96%.

### 10.3.3.2 Apagadores para pasta

Los apagadores para pasta, como el nombre implica, apagan o hidratan la cal en una forma de pasta. La proporción de cal agua es generalmente 1 a 2,5. Los apagadores para pasta son compactos en tamaño y a menudo se les diseña por un tiempo de retención de 5 minutos en la cámara de hidratación. En un apagador para pasta, el hidróxido en pasta es demasiado pesado para fluir por gravedad, por lo que un par de paletas horizontales empujan la pasta y la transportan hacia la descarga. Una vez que la pasta sale de la cámara de apagado, ésta es diluida a aproximadamente 1 parte de cal y 5 partes de agua. Esta dilución permite separar la “arena” por gravedad o por un harnero con vibrador externo para “arena”. La consistencia de la pulpa de un apagador para pasta y un apagador cerrado para pulpa es exactamente la misma después de eliminada la “arena”.

Los apagadores para pasta están disponible en tamaños que van desde 0,45 a 3,6 t/h. Estos apagadores, para pasta, son comúnmente usados en EE.UU. La Figura 25 es una muestra de uno de estos equipos.



**Figura 25: Apagadores para pasta**

Tanto los apagadores cerrados para pulpa como los apagadores para pasta, desperdician el valor alcalinizante de la cal contenido en la “arena” que eliminan

### **10.3.3.3 Apagadores en molino de bolas**

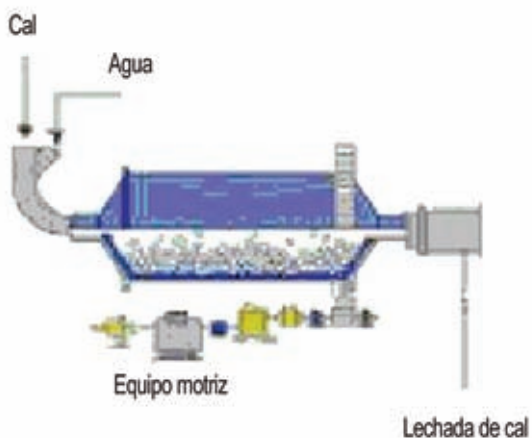
El apagador en molino de bolas es una adaptación de los molinos de bolas originalmente diseñados para humedecer y secar moliendo en el proceso de hidratación. Se usan dos tipos de molinos de bolas para apagado, horizontal y vertical. El vertical también recibe el nombre de molino de torre vertical o “Vertimill”. Se usan apagadores de molino de bolas generalmente donde:

- La capacidad requerida es demasiado grande para otros tipos de apagadores.
- No permiten descarga alguna en el lugar, Nada de “arena” se descarga y se deja en el lugar de preparación de lechada.
- Cuando el agua disponible es demasiado alta en sulfatos o sulfitos para apagadores regulares.
- Se requiere aprovechar al máximo el valor alcalinizante que posee la cal.

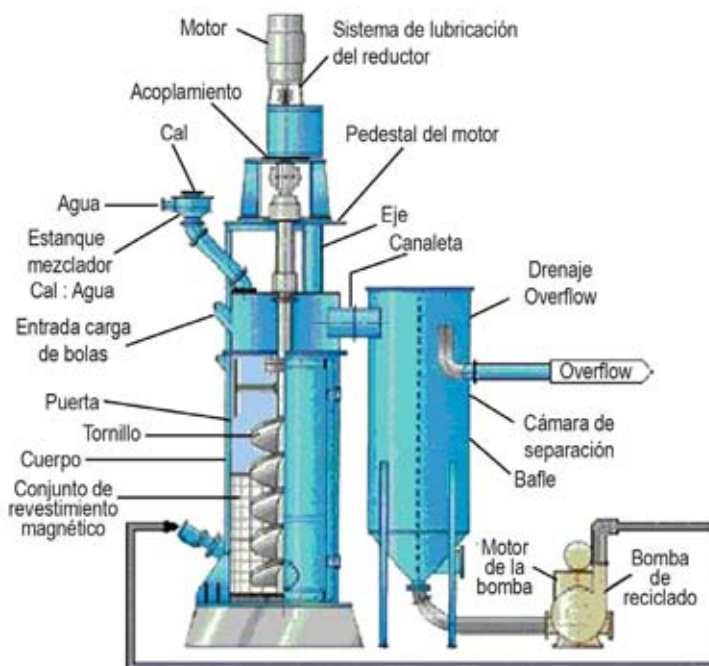
El apagador en molino de bolas es mucho más oneroso que los apagadores para pasta o apagadores para pulpa. Están disponibles en tamaños van desde 0,45 a 50 t/h. La Figura 26 muestra un apagador de cal en molino de bolas tipo horizontal y la Figura 27 muestra un apagador de cal en molino de bolas tipo vertical.

El apagador en molino de bolas se equipa con un clasificador externo, que separa la lechada del sobretamaño, “arena” e impurezas. El sobretamaño y “arena” es reciclado hacia la

alimentación de éste para introducirlo al sistema y remolerlo, con el fin de aprovechar al máximo el valor alcalinizante de la cal.



**Figura 26: Molino de bolas horizontal**



**Figura 27: Molino de bolas vertical o de torre**

### **10.3.3.3.1 Descripción de preparación de lechada de cal en molino de torre o “Vertimill”**

El molino de torre se utiliza mayoritariamente en los procesos mineros e industriales, cuyos consumos de cal sobrepasan las 1,5 t/h. Por su importancia a continuación se presenta una descripción más detallada de la preparación de lechada de cal en este equipo.

El molino de torre consiste en un cilindro vertical estacionario con un tornillo rotatorio, o barreno, que se extiende desde la parte superior del cuerpo hasta casi el fondo de éste. El tornillo gira a baja velocidad y hace circular una carga pequeña de bolas de molienda al interior del equipo. Mientras una proporción de cal y agua se está mezclando continuamente en el interior del molino, las bolas van moliendo las partículas más grandes de cal convirtiéndolas en partículas más pequeñas, con el fin de que reaccionen completamente con el agua para producir una pulpa consistente de lechada de cal.

Primero la cal y el agua se introducen en forma separada al estanque mezclador, dando inicio a la reacción entre ambas, luego esta mezcla o prelechada ingresa por la parte superior del molino. A medida que procede la molienda, las partículas gruesas de cal, que no han reaccionado completamente, tienen la tendencia a separarse y sedimentar en el fondo del molino. Sin embargo, el tornillo las levanta y las bolas proceden a molerlas permitiendo una reacción total con el agua produciendo la lechada final.

Las partículas finas de cal que han reaccionado completamente con el agua tienen menos tendencia a sedimentar. La adición continua de agua que viene del estanque de mezclado, produce el rebose de la pulpa del molino a una cámara de separación ( “bin” de rebose del molino de cal). Hay una placa deflectora en el interior de éste, que se extiende desde arriba del bin hasta casi el fondo. La pulpa al interior de la cámara de separación fluye por debajo del deflector y se mantiene en el otro lado hasta ser descargada desde la cámara al cajón de la bomba de alimentación del hidrociclón o batería de éstos, según sea el caso. Mientras la pulpa o lechada es forzada a fluir por el deflector, todas las partículas de cal que son muy grandes, sedimentan en el fondo de la cámara de separación y sólo la lechada de cal que ha reaccionado completamente se descarga de esta cámara de separación.

La cámara de separación está equipada, tanto con un depurador húmedo para remover los vapores desde el interior de ésta, como con una bomba de reciclaje.

El depurador húmedo es venteado por un ventilador que induce una corriente para aspirar los vapores desde la cámara de separación. El equipo cuenta con un rociador de agua para capturar cualquier partícula grande de cal que pudiese ser arrastrada fuera de éste. El rociador de agua humedece dichas partículas, haciendo que su peso sea mayor y así evita que sean arrastradas por el ventilador y por lo consiguiente, retornan a la cámara de separación.

La bomba de recirculación saca la pulpa que contiene partículas grandes desde el fondo de la cámara de separación y la recircula al molino, donde las partículas se vuelven a moler y la reacción de la cal con el agua llega a finalizar.

La temperatura dentro del molino debe ser vigilada acuciosamente, ya que valores excesivos podrían causar una explosión de vapor y daños tanto al personal como al equipo. Si el molino se sobrecalienta, la alimentación de cal se detiene y una válvula de agua fresca se abre para permitir el ingreso de ésta con el fin de refrigerar o enfriar el molino y la pulpa formada.

Las bolas de molienda requerida se alimentan por medio de una tolva localizada en la parte superior del molino

El interior del molino de preparación de lechada de cal está revestido con placas magnéticas. Se utilizan estos revestimientos magnéticos para atraer las bolas metálicas de molienda y formar así una capa de bolas en el interior de éste que se conviertan en la superficie de desgaste. Con una capa de bolas de molienda firmemente adheridas a las superficie de revestimiento magnético, las bolas restantes se deslizará contra ellas a medida que el tornillo dentro del molino gira a través de las carga de bolas.

La lechada de cal se descarga por gravedad desde el “bin” o cámara de separación del molino de cal al cajón de la bomba de alimentación a hidrociclones donde se clasifica la pulpa en material grueso y fino, generando la separación de éstos. La parte que contiene los gruesos es descargada por el “apex” o fondo del equipo (“underflow”) y fluye por gravedad de vuelta hacia el “bin” del molino de cal, donde son bombeados por la bomba de recirculación hacia el interior del molino, para continuar con su molienda, antes de pasar nuevamente a reclasificación. Los finos que conforman la lechada de cal, son descargados por la parte superior del hidrociclón, “vortex”, originado un overflow que fluye por el distribuidor del molino de preparación por medio de válvulas, hacia los estanques de envejecimiento y distribución de ésta al proceso que la requiere.

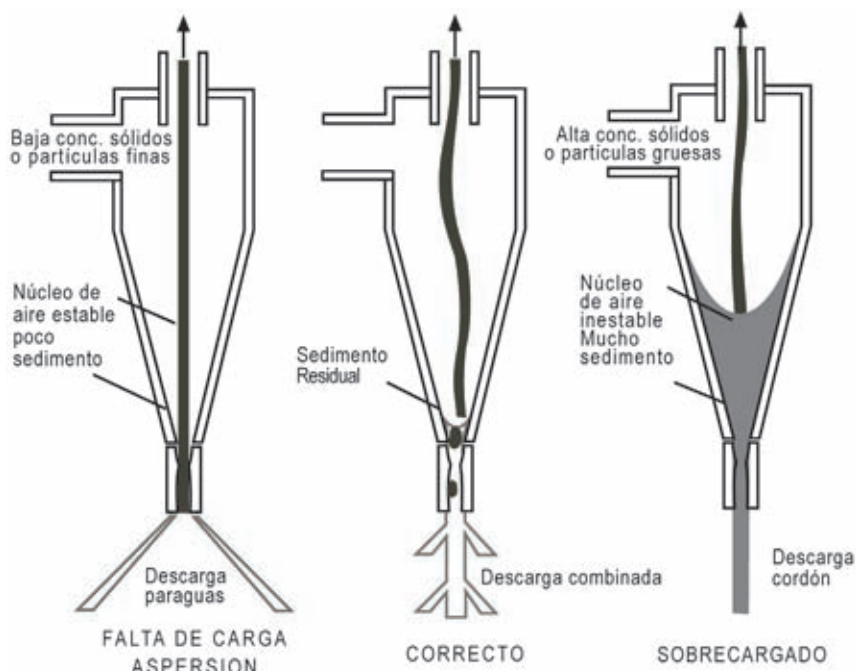
Los hidrociclones constan de una sección cilíndrica y una sección cónica. Normalmente están orientados para que el extremo cónico quede debajo de la parte cilíndrica. La pulpa entra por una tubería de alimentación tangencial a la sección cilíndrica y se desplaza hacia abajo, forzada por la nueva carga que va entrando detrás. A medida que la pulpa va ingresando, su movimiento en espiral crea fuerzas centrífugas permitiendo que las partículas sólidas más gruesas y más pesadas se muevan a la pared externa. Esto desplaza forzadamente al líquido junto a las partículas sólidas más finas y más livianas hacia el centro del ciclón. A medida que la pulpa continúa descendiendo hacia el apex del ciclón, el estrechamiento del cono va restringiendo el flujo. Las partículas en suspensión más pesadas y más gruesas, salen por el ápex en forma de un vórtice por el rebose o vortex.

El rebose se realiza por el tubo buscador de vórtice o “vortex finder” que es un tubo introducido en la parte superior de la sección cilíndrica del hidrociclón, que sirve para proteger el vórtice de ser perturbado por la alimentación y para conducir la corriente ya clasificada fuera del hidrociclón.

Debe haber siempre una columna central de aire para mantener el vórtice. Si el hidrociclón se llenase de lechada, la acción de movimiento en espiral cesaría y el equipo ya no clasificaría apropiadamente. El aire se pierde por el rebose, pero es continuamente reemplazado por aire introducido hacia arriba del hidrociclón por el apex.

El hidrociclón exige altas velocidades de pulpa, para generar las fuerzas interiores necesarias que permitan el funcionamiento apropiado. Las velocidades altas producen alta resistencia para fluir, y requieren que la alimentación sea presurizada. La densidad de la pulpa de alimentación, la presión de alimentación y los diámetros de salida del apex y del vortex y la posición del tubo buscador de vórtice, determinan la eficiencia con que las partículas gruesas y finas son separadas. Tal eficiencia se caracteriza por tres parámetros: (i) el tamaño de corte ( $d_{50}$ ), que corresponde al tamaño con un 50% de probabilidad de reportar el rebose o en la descarga, (ii) el índice de selectividad, que mide la agudeza del corte en el tamaño  $d_{50}$  y (iii) el cortocircuito de finos, que es la fracción de finos que reporta en los gruesos.

Cuando la tasa de alimentación, presión, y/o densidad de pulpa que entra en el hidrociclón disminuye, las fuerzas descendentes sobre la lechada disminuyen comparadas con las fuerzas centrífugas interiores del equipo y como resultado, el ángulo de dispersión aumenta. Esto se conoce como rociado y a su vez origina un rebose (overflow) del hidrociclón más fino. Mientras que cuando la tasa de alimentación y la presión aumentan, el ángulo de dispersión disminuye. Un ángulo de dispersión bajo indica una eficiencia baja del equipo, porque las fuerzas de separación (centrífuga) son relativamente bajas. El caso extremo ocurre cuando el hidrociclón se carga excesivamente y la pulpa desciende verticalmente por el ápice del equipo (en forma de cordón), esto indica que el vórtice ya no existe; la columna central de aire no está presente, en cuyo caso el hidrociclón ya no está clasificando correctamente la carga. Cuando el equipo está operando según diseño, el ángulo de descarga aproximadamente se asemeja al ángulo de la punta del equipo.



**Figura 28: Formas de funcionamiento de hidrociclones**

Una vez que los finos son separados, se envían a los circuitos de distribución de lechada, los que la suministran al proceso por medio de válvulas de control, las cuales son accionadas por controladores que reciben señales de medición de pH del proceso y adicionan la cal según la tasa requerida para mantenerlo dentro de los límites establecidos por la operación.

Los derrames de la planta de lechada, generalmente se recolectan en un canal de drenaje que fluye hacia el cajón recolector del área de relaves.

## 11. FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE APAGADO

El factor más importante que afecta la eficiencia de un sistema de apagado de cal, es el área expuesta para la reacción, el que viene dado por la superficie específica de las partículas de óxido de calcio. Mientras mayor es esta área superficial, mayor es el área de la superficie específica del hidrato obtenido en el apagado y por ende, mayor es la superficie disponible para la reacción, lo que se traduce en una reacción más completa, facilitando la posterior disolución de la cal en el agua. Esta característica es muy relevante según el tiempo de reacción que dispone el proceso en el cual se emplea la lechada de cal y la cantidad de agua que el proceso dispone para solubilizar la cal.

La superficie específica del hidróxido de calcio varía debido a la amplia distribución de tamaños, fundamentada en diversas variables. Un rango de superficie específica típica del hidróxido de calcio es entre 8.000 a 58.000 cm<sup>2</sup>/g.

Datos empíricos muestran que la relación entre el tamaño de la partícula del hidrato y la superficie específica no es lineal. La tabla 14 muestra 10 tipos de cal con diferentes tamaños de partículas y diferente superficie específica de los hidratos. Estos datos confirman una falta de correlación directa entre tamaño de partícula y superficie específica.

CAL	TAMAÑO DE PARTÍCULA (μm)	SUPERFICIE ESPECÍFICA (cm <sup>2</sup> /g)
1	2,2	5.000
2	2,2	6.000
3	2,2	7.000
4	2,4	7.000
5	2,5	9.000
6	2,9	110.000
7	3	110.000
8	3,1	12.000
9	3,4	7.000
10	3,9	9.000

**Tabla 14: Valores de tamaño de partícula, en micrómetros y de su superficie específica**

La tabla anterior deja en evidencia de que aunque el tamaño de partícula sea igual o menor, la superficie específica es diferente. En algunos casos incluso llega a ser mayor aunque el tamaño de partícula sea mayor. Ello se atribuye a diferencias en rugosidad, pliegues y fisuras internas, que no cambian el tamaño geométrico pero sí el área superficial.

## **12. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DEL APAGADO**

Los siguientes factores afectan, directa o indirectamente, la eficiencia de apagado, concernientes a la superficie específica del hidróxido de calcio obtenido:

- 12.1. Tipo de caliza usada en la calcinación
- 12.2. Proceso de calcinación usado para fabricar CaO
- 12.3. Temperatura de hidratación o apagado
- 12.4. Razón o proporción agua cal
- 12.5. Grado de agitación durante la hidratación
- 12.6. Viscosidad de la pulpa
- 12.7. Tiempo de hidratación
- 12.8. Composición del agua utilizada
- 12.9. Temperatura del agua
- 12.10. Aplicación de apagado o hidratación aérea

### **12.1. Tipo de Caliza usada en la calcinación.**

El carbonato de calcio utilizado generalmente no es puro. Contiene otros elementos, tales como: magnesio, aluminio; hierro; silicio y otras especies que afectan la calidad del apagado. Los fabricantes de cal no tienen mayor control sobre las impurezas que se esparcen en una vena de caliza, pero sí tienen un control sobre el valor mínimo de carbonato a utilizar en el proceso de fabricación de cal. Tampoco tienen injerencia sobre la geometría de la partícula ni sobre la distribución granulométrica que se puede obtener en la trituración; si tienen control del tamaño máximo y mínimo de la caliza para introducirla al horno y aunque en el proceso se generen cambios de los tamaños de las partículas por abrasión en su transporte, por lo menos pueden definir un rango que permita que la mayor parte del producto sea superior al promedio esperado.

### **12.2. Proceso de Calcinación para fabricar CaO**

La temperatura y el tiempo de residencia durante calcinación tienen mucha influencia en la calidad del apagado producido. El problema más común asociado con el proceso de calcinación es la cal cruda o la cal requemada, una de las cuales prevalece según sean las condiciones de operación aplicadas.

Cuando la cal es requemada, se forma una capa exterior en la partícula de cal que puede llegar a ser impenetrable, dificultando así la penetración del agua, para dar inicio al proceso de apagado y obtener la lechada. Para el apagado de una cal requemada, la capa exterior de la partícula debe desaparecer y exponer los poros para la penetración del agua. Esto se hace con agitación vigorosa, o molienda, que desgasta esta capa exterior de la partícula de cal viva. Este tipo de cal generalmente requiere más tiempo de retención en el hidratador. En la práctica utilizar cal requemada, significa trabajar con una carga circulante mayor en el molino apagador, para minimizar el transporte de cal viva, aguas abajo.

Esto es más notorio cuando en el apagador se utiliza un separador de arena o sedimentador gravitacional. En tal caso las partículas de la cal requemada que no se apagan flotarán en la cámara de la separación de las arenas, debido al aire interior atrapado en los poros de la partícula de cal viva. Las partículas que flotan pueden causar obstáculo en las tuberías, en los pulverizadores, en los atomizadores y otros, a no ser que la lechada se utilice envejecida. Por otro lado, si las arenas son separadas de la lechada se produce una disminución importante de alcalinidad, debido a la pérdida de valor alcalinizante de la cal, a causa del pH que otorgan estas partículas, sobre 12,6, aumentando considerablemente el consumo de cal.

### **12.3. Temperatura de Hidratación o Apagado.**

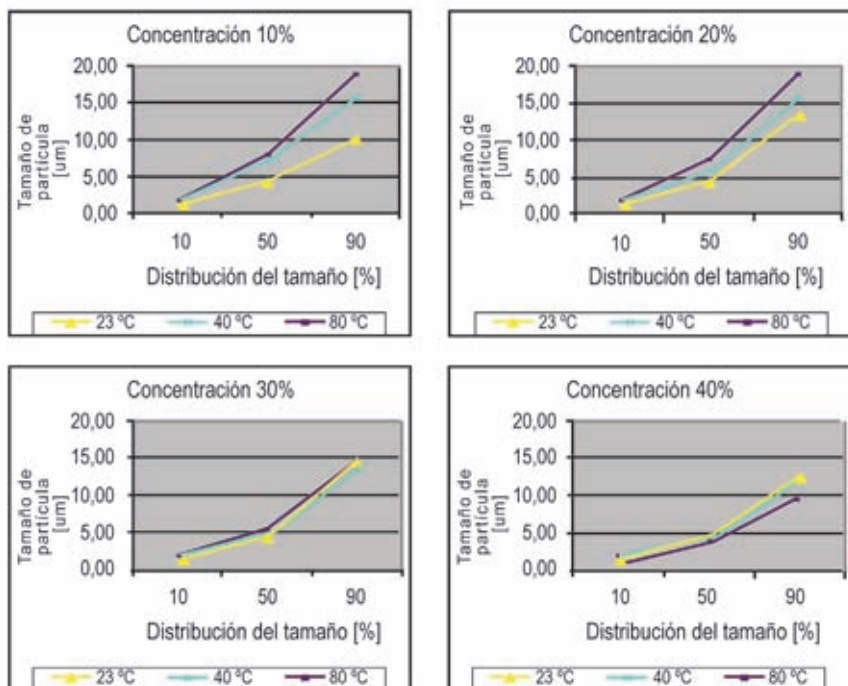
La temperatura de apagado puede en ocasiones ser un factor controlante porque a algunas cales les afecta en el tamaño de partícula y por ende la superficie específica de las partículas del hidrato. Según algunos autores, la temperatura más cercana de hidratación, para lograr un polvo fino y seco de hidrato, es de 99°C (210°F) donde se obtienen las partículas más finas y la superficie específica mayor. Sin embargo, no siempre se encuentra una correlación estrecha entre temperatura, tamaño de partícula y superficie específica.

Hay situaciones que si el apagado o hidratado es a temperaturas altas, alrededor o cerca del punto de ebullición del agua, manchas calientes pueden desarrollarse dentro de la pulpa, generando la ocurrencia de partículas de hidrato cristalizado y aglomerado, con partículas más grandes y compactas con reducida o pequeña superficie específica. Este problema es muy probable que ocurra en apagadores para pasta, donde operan a temperaturas más altas y en las áreas donde el mezclado no es vigoroso.

Es probable que en condiciones ideales o de laboratorio sea factible preparar lechadas de cal a la temperatura de 99°C, lo que no es repetible en algunas faenas, en particular en aquellas a gran altura geográfica, donde la presión atmosférica es menor que la normal y el agua disminuye su punto de ebullición, por lo que la generación de vapor por un lado puede afectar en la operación del molino y por otro, generar un aprovechamiento ineficiente del recurso hídrico, al aumentar la pérdida de éste.

Para producir lechada a partir de cal INACESA, en concentraciones que fluctúan entre 10% a 20% de sólidos, en la práctica se debe operar a la menor temperatura posible para conseguir las partículas de menor tamaño. Sin embargo, hay otros tipos de cal, cuya temperatura óptima de hidratación está entre 71°C a 85 °C (160 a 185°F).

Realizando experiencias con la cal de INACESA, se encontró que el tamaño de partícula no depende de la temperatura de apagado, sino más bien de la concentración de cal en la lechada, tal como lo muestra la Figura 29.



**Figura 29: Tamaños de partículas de cal obtenida en una lechada preparada a partir de cal viva granulada, 100% bajo 3/4", a distintas temperatura de reacción de la cal con el agua.**

Aunque desde un punto de vista teórico, una temperatura alrededor de 100 °C (212°F) es deseable en el apagado de la cal, desde un punto de vista práctico es difícil obtener -sin problemas- tanto para la seguridad, como por un apagado alterado por la aglomeración, porque la cal a mayor temperatura es menos soluble, como lo demuestran los resultados de distribución granulométrica obtenidos e indicados en la figura 30.

El calor liberado debido a la reacción exotérmica, es diferente para distintas calidades de cal. Una cal quemada blanda de alta reactividad, genera un calor de 273 kilocalorías por kilogramo de cal viva. Una cal de baja reactividad produce aproximadamente un calor de 212 kilocalorías por kilogramo de cal viva.

La temperatura de la lechada queda determinada por el balance de entalpía de la cal seca entrante, del calor generado y de las pérdidas del calor desde el apagador.

En algunos casos para lograr la temperatura final de apagado recomendada, se debe agregar calor auxiliar, el que proviene de una fuente externa, como agua caliente o una fuente interior, que podría ser incrementando la dosis de cal alimentada, asumiendo el riesgo que una mayor concentración de cal podría generar aglomeración de ésta, lo que obviamente significa aumentar el consumo de energía y el costo de preparación de la lechada de cal, que en el caso de las cales de INACESA no es necesario ya que a menor temperatura, menor tamaño de partícula.

Entonces la temperatura óptima para la preparación de la lechada, varía de faena a faena y depende del equipo, de las condiciones de operación y principalmente del tipo de cal viva que se utilice para preparar la lechada.

La Figura 30A, señala que preparar una lechada de cal, a partir de cal viva granulada, 100% bajo 3/4" (19,0 mm), a temperatura ambiente (23°C), se obtiene un producto con una distribución en que el 90 de las partículas están bajo 12,39 micrómetros. La figura 30B muestra que la misma cal, a igual velocidad de agitación, pero a una temperatura de 40°C conduce a un producto con un 90% de las partículas bajo 16,32 micrómetros y la figura 30C indica que a 80 °C, en las mismas condiciones anteriores, se obtiene un producto con un 90% de las partículas bajo 21,11 micrómetros. Esto ratifica que para la cal de INACESA, la mayor temperatura en la preparación de lechada, entrega menor superficie específica en las partículas hidratadas de cal.

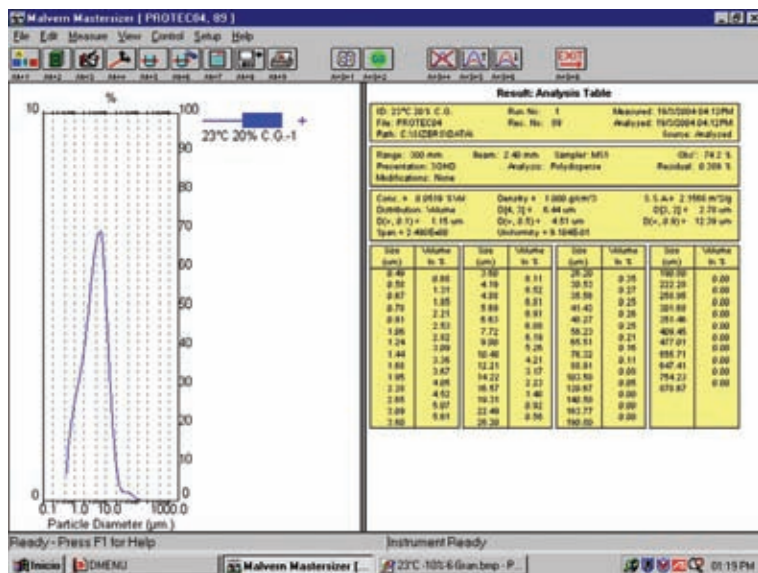


Figura 30A: Distribución del tamaño de partícula de la cal hidratada en lechada preparada a 23°C

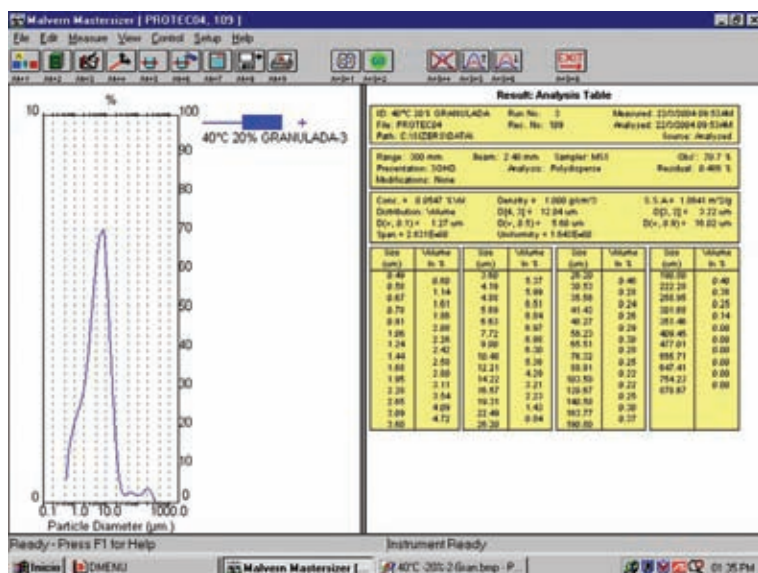


Figura 30B: Distribución del tamaño de partícula de la cal hidratada en lechada preparada a 40°C

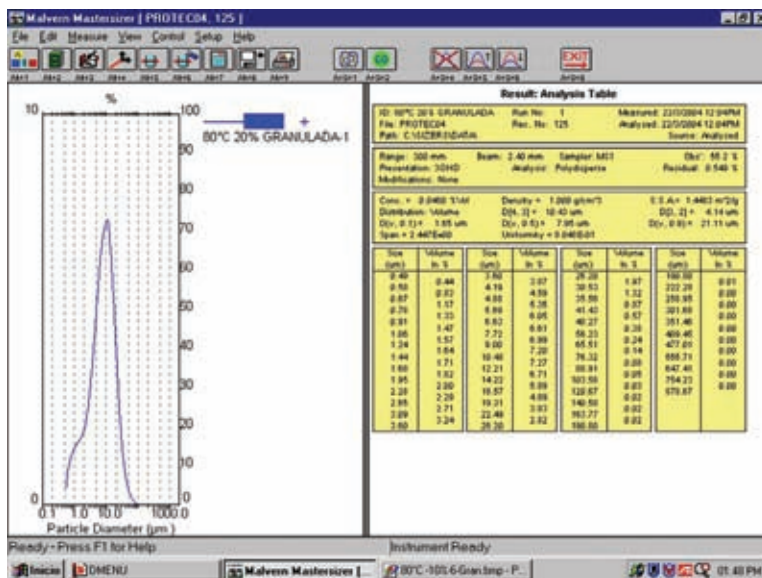


Figura 30C: Distribución del tamaño de partícula de la cal hidratada en lechada preparada a 80°C

#### 12.4. Razón o Proporción Agua: Cal

La razón o proporción agua:cal, afecta al tiempo de hidratación influyendo en la temperatura del apagado. Una temperatura más alta disminuye tanto el tiempo de hidratación, como la solubilidad de la cal. Controlar una proporción constante de agua:cal en el proceso de apagado tampoco garantiza una temperatura constante. La temperatura varía debido a la variación de la temperatura ambiental, la calidad del agua, y la reactividad de la cal, por lo tanto se requieren frecuentes ajustes del operador. Como se mencionó antes, la mejor manera de mantener una proporción correcta de agua:cal es controlando la temperatura de hidratación. Pruebas de apagado ejecutadas con la misma cal pero con diferentes proporciones de agua, mostraron diferencias significativas en la tasa de sedimentación. En ambos casos, se permitió que las muestras sedimentaran hasta un 50% de su volumen.

Proporción Agua : Cal	Sedimentación del 50% [minutos]
Cal hidratada con cantidad teórica mínima de agua	10
Cal hidratada con 10 veces la cantidad teórica de agua	440

Esto claramente indica que un exceso de agua utilizada en la hidratación dará por resultado partículas más pequeñas, asumiendo que la temperatura de hidratación fue la misma.

Intentar mantener la temperatura de una lechada de cal 10 veces menos concentrada, significa mantener en el sistema de preparación de lechada el agua en ebullición, o bien

contar con un sistema de apagado de cal con la cantidad teórica mínima de agua, con un sistema de absorción de energía o enfriamiento brusco del mismo. Ambas situaciones, dificulta o afecta a la sedimentación. Por lo mismo, se ratifica lo mencionado y demostrado en el punto anterior, que la lechada de cal a temperatura ambiente pareciera ser lo ideal, ya que entrega partículas más pequeñas

## **12.5. Grado de Agitación Durante la Hidratación**

La agitación es una variable que tiene mucha incidencia en la preparación de lechada, ya que evita que ocurra una heterogeneidad de la temperatura en el sistema, esto no indica ni refleja la temperatura ideal de hidratación, ya que ésta es definida según el tipo de cal utilizada.

Cuando la agitación se baja y es deficiente, se obtiene por resultado temperatura desuniforme al interior del molino de apagado, produciendo como resultado puntos calientes y fríos. Las zonas o puntos calientes son el resultado de temperaturas de apagado por sobre los 100°C (212°F). Hidrataciones a estas temperaturas dan por resultado cristales hexagonales 2 veces más grandes y con área superficial reducida, aglomerando las partículas

Adicionalmente en las zonas frías las partículas de cal viva se ahogan o quedan no hidratadas o no apagadas.

Deficiente agitación de la cal en el agua con la que se prepara la lechada produce una aglomeración de los silicatos y aluminatos cálcicos que se enlazan con el hidróxido de calcio, generando una nueva partícula esférica de cal hidratada que envuelve y encapsula los silicatos-aluminatos. Al comenzar la formación de estas partículas son blandas al tacto, pasado un período de tiempo fraguan y endurecen. En algunas plantas compactas estas esferas son eliminadas junto a la grancilla de la cal, produciéndose pérdida de cal, disminución de alcalinidad y por consecuencia mayores consumos de cal. La Figura 31 muestra un difractograma de la grancilla señalada.

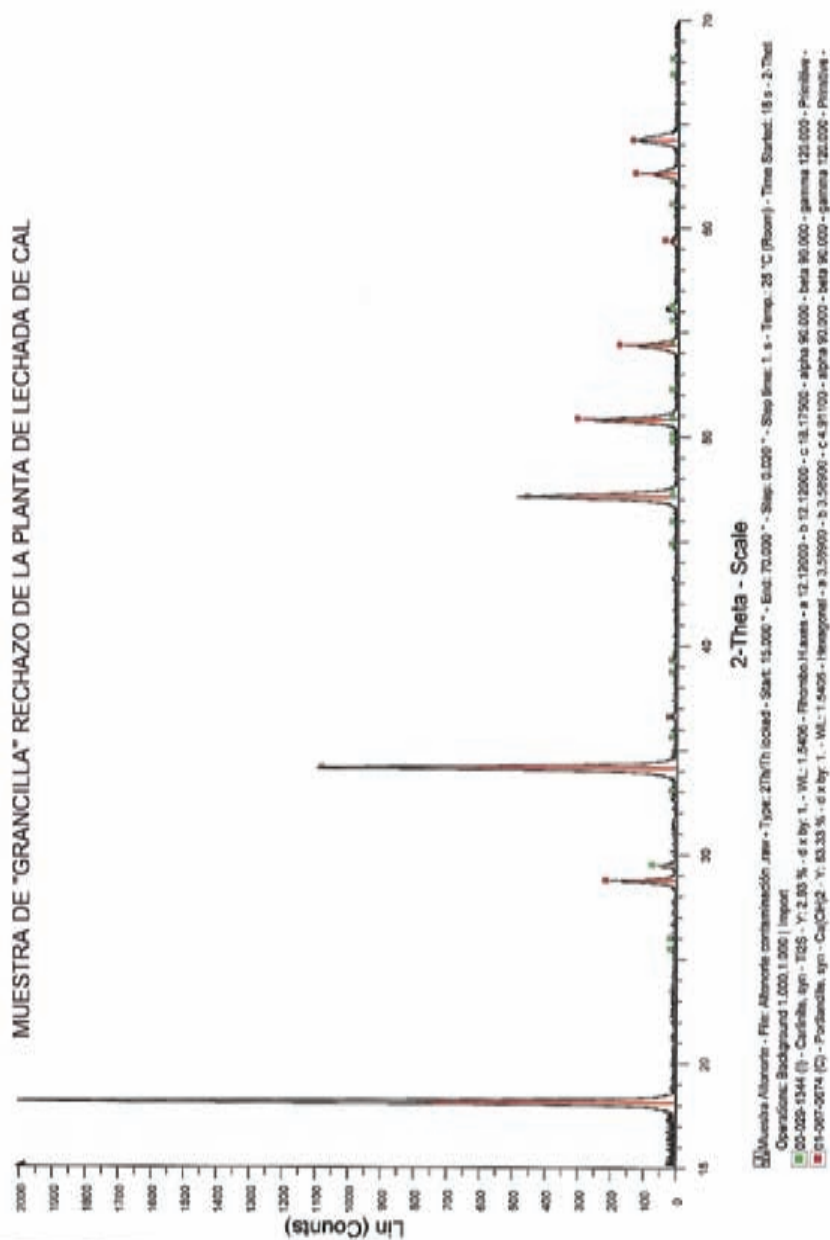


Figura 31: Difractograma de partículas esféricas en planta de lechada compacta

## 12.6. Viscosidad de la Pulpa o Suspensión

La viscosidad de la suspensión de cal así como las condiciones del proceso, pueden variar fuertemente de cal a cal. Ciertos cambios en las condiciones de apagado, el tamaño de partícula de la cal viva a hidratar y las impurezas en la cal viva, aumentan la viscosidad de la pulpa, suspensión, o lechada, afectando el tiempo de sedimentación. A menudo la viscosidad aumenta la temperatura del apagado a 82°C (180°F) y más.

La relación entre la viscosidad, el tamaño de partícula, la superficie específica y la tasa de sedimentación no se han investigado completamente, sobretodo por causa de que la reacción propia de la cal con agua genera un incremento de volumen hasta 2,5 el cual provoca un rompimiento no uniforme entre partículas y partículas, deja un área muy heterogénea, expuesta a la reacción con el agua, lo que no es factible de controlar. Esto queda de manifiesto en la Tabla 14, donde se muestra que partículas con igual tamaño, presentan distinta superficie específica.

En general, una viscosidad significa partículas más pequeñas, granulometría de hidrato más pequeño, superficie específica y tiempo de sedimentación más altos. Se han encontrado variaciones de viscosidad en lechadas de cal a partir de cal hidratada, que van entre 45 centipoises y 700 centipoises.

## 12.7. Tiempo de Hidratación

Se denomina el tiempo de hidratación al tiempo requerido para completar el apagado. Este tiempo varía según el tipo de cal. Una cal altamente reactiva completa su hidratación en 2 a 3 minutos. La hidratación de cales medianamente reactivas se completa en 5 a 10 minutos. En cales de baja reactividad, cales duramente quemadas, y cales magnesianas, la hidratación se obtiene en 15 a 30 minutos. Esto significa que mientras haya un tiempo de residencia en los estanques de lechada de cal mayor a 30 minutos, independiente de la cal utilizada en cuanto a la reactividad en agua, toda la cal se encontrará apagada y por ende, aguas abajo, una vez que se diluya con la mayor cantidad de agua que tiene el proceso donde es utilizada, será solubilizada si la concentración en la dosificación de cal no sobrepasa 1,4 kg de cal/m<sup>3</sup> de agua

## 12.8. Composición de la Calidad del Agua

La caracterización química del agua es un factor muy importante en el proceso de apagado. La presencia de ciertos compuestos químicos en el agua de hidratación, aceleran o impiden el proceso de hidratación. Generalmente el agua con altos sólidos disueltos generalmente causa excesiva espuma, que da por resultado problemas operacionales. Aguas que contienen por sobre 500 ppm de sulfatos o sulfitos son indeseables para el apagado. Ésto es más

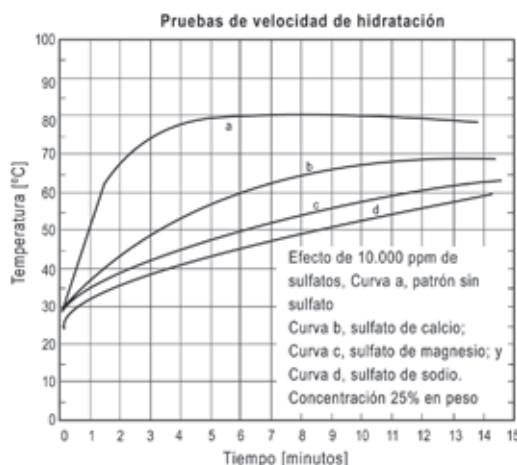
perjudicial en apagadores para pasta y apagadores para lechada de cal. En los apagadores tipo molino de bola, debido a su habilidad para moler las partículas de cal y arena, no afecta tanto la presencia de sulfatos o sulfitos en el agua de hidratación.

Los sulfatos o sulfitos cubren la superficie de la cal granulada, obstaculizando que el agua penetre por los poros y por consiguiente, la hidratación se retarda fuertemente la hidratación. Un apagado bajo estas condiciones obliga a desgastar continuamente las partículas de cal, para exponer nuevas superficies al agua de hidratación, que es lo que se realiza en los molinos de bolas y de torre utilizados para la preparación de lechada.

No se debe dejar de lado que la alta concentración de sulfato o sulfito en el agua, genera la formación de cristales de sulfato o sulfito de calcio que pueden inducir la formación de incrustaciones en las áreas sensibles del sistema de lechada de cal, sobretodo si no se toman las precauciones necesarias en cuanto a la velocidad de transporte hidráulico de ésta, y la limpieza con agua sin cal de todo el sistema una vez que éste finalice la operación y sea paralizado.

Generalmente la presencia de sulfatos en aguas ácidas de mina o de rocas, produce un lodo de sulfato de calcio con tamaños muy finos de partículas que presentan dificultades -aguas abajo- en el proceso de sedimentación o filtración, para la separación de las fases sólido/líquido. Esta característica se debe principalmente porque en los procesos continuos se adiciona la lechada de cal en forma acelerada, provocando una alta nucleación y muy bajo crecimiento cristalino. Una solución que ha sido efectiva es la utilizada en los procesos HDS, High Density Sludge, alta densidad de lodos, que consiste en aumentar la concentración de sulfato de calcio, donde se produce la reacción o mezcla de cal o lechada con este tipo de agua, enviando desde los decantadores parte del lodo al estanque de mezcla.

La Figura 32 muestra el efecto de incremento de temperatura versus tiempo, para aguas que contienen distintos tipos de sulfato.

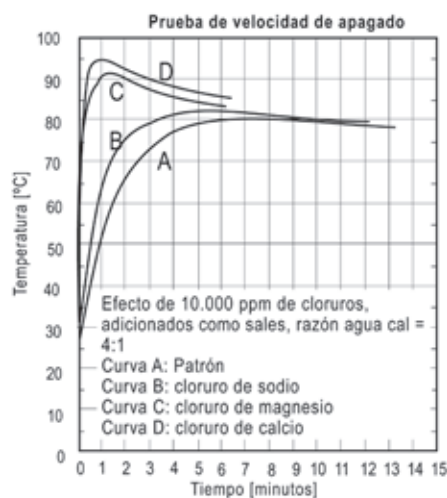


**Figura 32: Efecto de la temperatura en aguas que contienen sulfatos en la hidratación de cal**

Algunos elementos químicos actúan como catalizadores para el proceso de apagado, éstos son los cloruros y los azúcares.

El contexto anterior para preparar la pulpa, suspensión, o lechada de cal, se puede utilizar efectivamente agua de mar. Sin embargo, el material de construcción del apagador debe considerar la corrosión causada por los cloruros.

La Figura 33 a continuación, muestra los efectos de los cloruros contenidos en el agua de apagado sobre el proceso de apagado de la cal



**Figura 33: Efecto de los cloruros en el apagado de la cal**

## 12.9. Temperatura del Agua

Más que la temperatura del agua en la preparación de la pulpa, suspensión o lechada, la velocidad con la cual se agrega el agua en la cal, tiene fuerte influencia en el proceso de hidratación, porque afecta la superficie específica de las partículas hidratadas o apagadas.

La temperatura del agua entrante y la razón agua : cal afectan inversamente el tiempo de hidratación.

El agua fría de hidratación no debe contactarse con la cal seca antes de ingresar en el apagador. El agua y la cal deben entrar al apagador en forma separada, de manera que disponga de tiempo para desarrollar la reacción de hidratación y la expansión natural al cambiar de óxido a hidróxido. Como consecuencia de esta reacción, hay un aumento en la temperatura por sobre los  $65,5^{\circ}\text{C}$  ( $150^{\circ}\text{F}$ ), lo que hay que controlar para evitar que ésta aumente indiscriminadamente generando una condición insegura de operación.

Si el agua fría y la cal entran en contacto bruscamente, se produce la condición llamada “ahogamiento” no dejando que la cal se hidrate. Como resultado habrán partículas de hidrato formadas bajo condiciones de “ahogamiento” las que serán más gruesas y reaccionarán más tardía y lentamente con el agua. Sin embargo, en las plantas de lechada de cal, donde se requiere una suspensión de partículas hidratadas, dado el gran volumen de agua y los equipos molturadores utilizados, este fenómeno en la práctica no ocurre, a causa del rompimiento mecánico de las partículas, que va exponiendo nuevas y más pequeñas partículas al agua, por lo que la reacción de hidratación va ocurriendo correctamente.

## 12.10. Apagado o Hidratación Aérea

La hidratación aérea es causada por apagado de la cal viva que entra en contacto directo con la humedad del aire y la temperatura ambiental. Las partículas más finas de cal viva son más proclives a una hidratación aérea, debido a la gran superficie específica. El apagado aéreo no sólo produce partículas sumamente grandes de hidrato, sino que también convierte el óxido del calcio en carbonato de calcio, debido a la absorción del  $\text{CO}_2$  atmosférico o ambiental. Una cal hidratada aérea aumenta el consumo debido a la presencia de  $\text{CaCO}_3$  formado.

### 13. TRANSPORTE HIDRÁULICO DE LA LECHADA DE CAL

Generalmente la lechada es enviada desde los estanques de agitación por dos circuitos de distribución que funcionan en paralelo. Un circuito es el de servicio principal y ambos tienen considerado tubería para el retorno de ésta a los estanques de agitación, con el fin de controlar la velocidad de flujo que ésta debe tener para minimizar las incrustaciones en algunos sectores de los circuitos.

Así como el material del centro de la partícula corresponde a carbonato de calcio, crudo, ( $\text{CaCO}_3$ ) cuyo pH natural es menor que 8,2 y afecta la calidad de la lechada de cal, también la cal industrial tiene compuestos que son un aporte a la alcalinidad que genera la lechada, uno de ellos es el material requemado que se encuentra en la superficie cubriendo la partícula de cal que corresponde, generalmente a calcio combinado químicamente con sílice y aluminio, generando compuestos que tienen pH natural mayor a 12,6, tal como lo señalan las reacciones químicas de la 1.12 a la 1.16.

Considerando lo anterior, es conveniente tener claridad en cuanto al uso que se le dará a la lechada aguas abajo, ya que dependiendo de los volúmenes de agua utilizado podemos encontrarnos con situaciones en que la lechada puede alcanzar su total solubilidad de 1,4 g/l, pasando a estado iónico el calcio e hidróxido involucrados en el compuesto, facilitando la medición de pH del sistema en que está siendo aplicada.

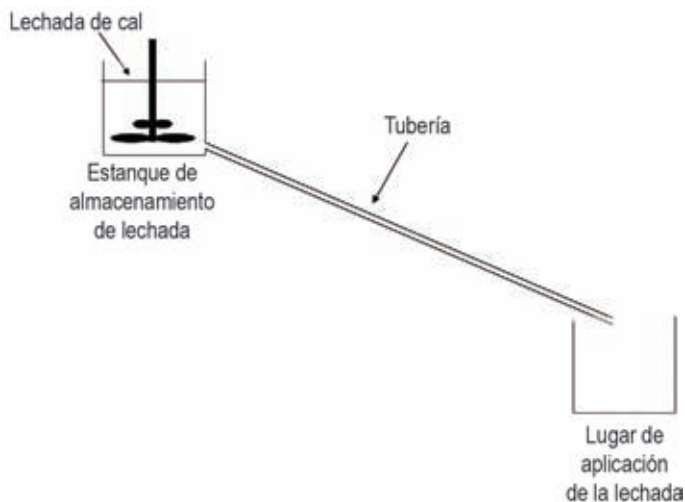
Vale la pena recordar que la lechada de cal debe su nombre a la insolubilidad en agua de ésta, debido principalmente a la sobresaturación de la cal en agua. Esta sobresaturación es la que complica tanto su transporte hidráulico como la medición de pH en algunos sistemas.

Uno de los motivos por el cual la cal se adiciona como lechada en los procesos, ha sido traspasado de generación en generación y probablemente la causa viene desde la época en que no habían equipos que permitieran controlar pequeñas adiciones de cal, por lo que para disminuir los errores de dosificación fue diluida entre el 10 al 15% en agua. Esto ha traído como consecuencia el desaprovechamiento de la energía calórica que genera la reacción entre la cal y el agua y el uso indiscriminado de agua en las plantas de lechada de cal.

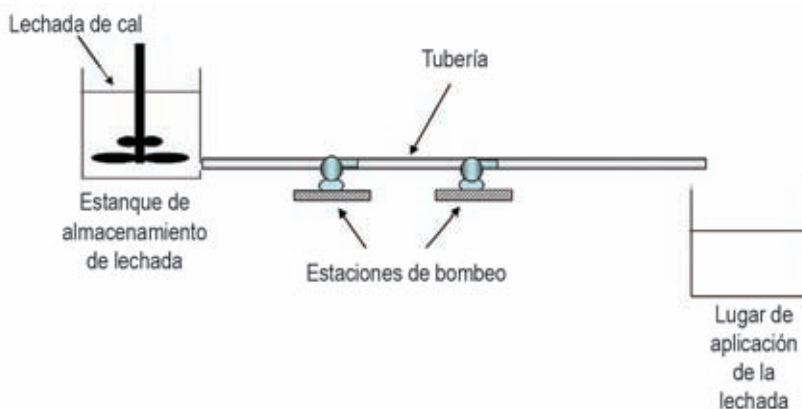
El fluido transportante es el agua, la cual al mezclarse con la cal genera la reacción de hidratación o apagado explicada anteriormente, que cambia las condiciones del sólido de  $\text{CaO}$ , el cual pasa a ser  $\text{Ca(OH)}_2$ . La expansión que sufre la partícula para la liberación de la energía generada produce un cambio “natural” del tamaño de ésta y por ende afecta a su densidad y su gravedad específica.

El sistema más utilizado es el transporte hidráulico a presión, presentando todas las ventajas que este tipo de transporte posee: posibilita desarrollar trazados sinuosos; se comporta bien

en grandes desniveles; es adaptable a cualquier topografía; presenta un mínimo efecto en condiciones climáticas adversas; permite una operación continua y comando remoto; tiene menores costos de operación; tiene costos de inversión competitivos; requiere mínima mano de obra, es de alta productividad y tiene un mínimo impacto ambiental. La fuerza impulsora generalmente es la diferencia de cota entre el estanque preparador y el lugar de uso o aplicación de la lechada. Por lo tanto, el transporte se puede realizar en forma gravitacional o en su defecto por bombeo, tal como se indica en las Figuras 34 y 35, siendo muy importante destacar que la velocidad de flujo es crítica para evitar las incrustaciones o desgaste de las tuberías.



**Figura 34: Transporte de lechada de cal en forma gravitacional**



**Figura 35: Transporte de lechada por bombeo**

En el transporte por bombeo se deben considerar las variables que son dependientes del sólido a transportar; del fluido transportante; de la instalación en sí; de la mezcla y del sistema a utilizar.

Las variables dependientes para cualquier sólido a transportar son:

- Granulometría
- Dureza
- Densidad
- Forma

En el caso de la cal, sólo en la "grancilla o arenilla" se debe considerar la densidad y la forma, ya que en la reacción con el agua, las partículas se expanden, aumentan su volumen, se transforman en hidróxido, quedando la mayoría de las partículas bajo # 400 mallas, afectando la densidad de la pulpa, la geometría y el tamaño de partícula.

Las variables dependientes del fluido transportante son:

- Densidad, en el caso de la cal se utiliza agua, por lo que la densidad, en condiciones normales es igual a la unidad.
- Viscosidad cinemática, que para el agua a 20°C es de  $9,8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$  y la viscosidad estática, que a 290°K es de  $1080 \times 10^{-6} \text{ Nseg/m}^2$  y de  $959 \times 10^{-6} \text{ Nseg/m}^2$  a 295°K, respectivamente.

Las variables dependientes de la instalación son:

- Diámetro interno de la cañería
- Longitud
- Desnivel
- Rugosidad interna
- Ángulos de inclinación de la tubería
- Singularidades (estrechamiento, codos, válvulas y similares)

Las variables dependientes de la mezcla son:

- Concentración de sólidos en volumen y en peso
- Densidad de la mezcla

Las variables dependientes del sistema son:

- Tonelaje de sólidos a transportar
- Velocidad de flujo
- Pérdida de carga

Algunas consideraciones para el transporte de lechada, son las siguientes:

- El sistema debe ser capaz de conducir la máxima producción que pueda requerir la faena minera
- Debe ser flexible para operar en un rango amplio de producción
- Debe tenerse en cuenta en su diseño problemas como:
  - o Corte de suministro de energía eléctrica
  - o Falta de agua
  - o Fallas operacionales
  - o Sismología
- Debe contar con un sistema de detección de bloqueo y de fugas, así como también, con piscinas de emergencia
- Los accesorios deben tener sistemas "stand-by" que permitan la mantención y prevención de problemas de erosión y corrosión
- Los operadores deben tener una clara concepción de los problemas que podrían aparecer en el sistema.
- Debe poseer un sistema de comunicación confiable y con respaldo para el diseño, para cuyo propósito deben realizarse pruebas de laboratorio
- Tanto el diseño, como la construcción y la operación deben estar completamente de acuerdo a la legislación vigente.

Algunas consideraciones para el diseño son las siguientes:

- Para la lechada de cal, las líneas de tuberías gravitacionales presurizadas son la mejor solución, de esa forma se evita que la lechada esté en contacto con el anhídrido carbónico ambiental y reaccione generando carbonato de calcio.
- El consumo de agua debe ser lo más bajo posible, a mayor concentración de sólidos

en suspensión, se minimizan las posibilidades de decantación e incrustación.

Dentro de los conceptos hidráulicos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El tamaño de las partículas sólidas
- La concentración de pulpa
- La viscosidad
- La velocidad límite
- La tasa de erosión
- La tasa de corrosión
- La pérdida de carga
- La selección de la tubería
- Las bombas, válvulas y selección de disipadores de energía

El criterio para la elección de rutas debe considerar a lo menos:

- Un análisis comparativo de varias rutas
- Para transporte en forma gravitacional, utilizar la máxima pendiente posible, hasta un 15%
- Análisis simultáneo de permisos y propiedades de terrenos
- Plataforma de un mínimo de 10 a 12 metros para instalar la tubería
- En los cruces de ríos, la tubería debe estar enterrada bajo la profundidad máxima de erosión.

Los regímenes de flujo deben cumplir a lo menos con:

- Flujo de sólidos en suspensión homogénea
  - o Las partículas sólidas deben viajar a la misma velocidad del fluido
  - o No debe generarse gradiente de concentración local ni de granulometría
  - o El comportamiento hidráulico de la mezcla tiene que ser muy similar a la de un fluido puro.

- Flujo de sólidos en suspensión heterogénea
  - o Los sólidos se mantienen en suspensión, pero como las partículas más pesadas tienden a caer, éstas no deben llegar al fondo de la tubería
  - o Se forma un gradiente vertical de concentraciones y granulometrías
- Flujo de sólidos con arrastre de fondo
  - o Las partículas más pesadas son transportadas, ya sea a saltos, rodando o deslizándose por el fondo de la tubería, viajando a una velocidad menor que la del fluido
  - o Las partículas más finas se mantienen en suspensión, por lo tanto viajan a la misma velocidad del fluido
- Flujo de sólidos con depósitos de fondo
  - o Si el flujo es débil, las partículas más pesadas de la fase sólida se depositan sobre el fondo de la tubería o canal,
  - o Se presenta un lecho fijo de sólidos o un tren de dunas a baja velocidad por la parte inferior del ducto y una nube de partículas arrastradas y/o suspendidas por encima de éstas
  - o El flujo con depósito estable de fondo, se presenta generalmente a bajas concentraciones y tamaños gruesos de sólidos
  - o Las dunas móviles son usuales en espectros granulométricos anchos y concentraciones importantes
  - o Es poco aconsejable trabajar en este régimen de flujo, porque se incrementa la probabilidad de incrustaciones
- Velocidad límite de depósito:
  - o Se debe cumplir con la mínima velocidad de flujo para que no exista riesgo de depósito y obstrucción de la tubería
  - o Los parámetros que influyen en la velocidad límite son:
    - Perfil granulométrico de las partículas sólidas, específicamente de las "arenillas o grancillas"
    - Densidad relativa de las partículas sólidas, principalmente de las "arenillas"

que contienen la cal

Diámetro de la tubería, a mayor diámetro, aumenta la velocidad límite de depósito

Dependiendo de la concentración de sólidos de la mezcla, la velocidad límite de depósito puede aumentar, mantenerse constante o disminuir. Entre un 10 a un 25 % en volumen, la velocidad límite aumenta con la concentración. Sobre un 30% en volumen, la velocidad límite empieza a disminuir suavemente con un aumento de la concentración. Bajar la velocidad límite parece no ser una buena política, debido a los riesgos de obstrucción por la difícil refluidización, la que es mayor en una pulpa a gran concentración que en una a baja concentración.

La inclinación de la tubería influye en la formación de dunas sobre el fondo de la tubería, tal como se ilustra en la Figura 36.

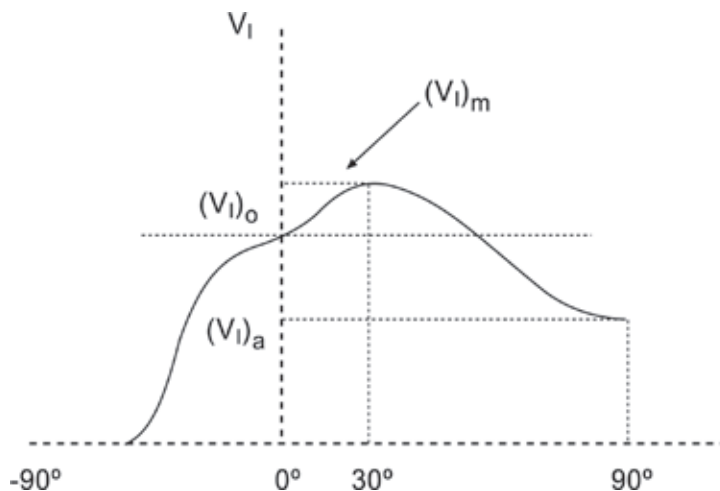


Figura 36: Curva de velocidad límite a distintas pendientes

- $(V_l)$  : Velocidad límite de la tubería horizontal
- $(V_l)_m$  : Velocidad límite máxima (para contra pendientes del orden de  $30^\circ$ ).
- $(V_l)_a$  : Velocidad límite de la tubería vertical ascendente, ella corresponde a la velocidad de sedimentación de la partícula de mayor tamaño del espectro granulométrico

Para trabajar con contra pendientes es necesario aplicar mayor velocidad de flujo.

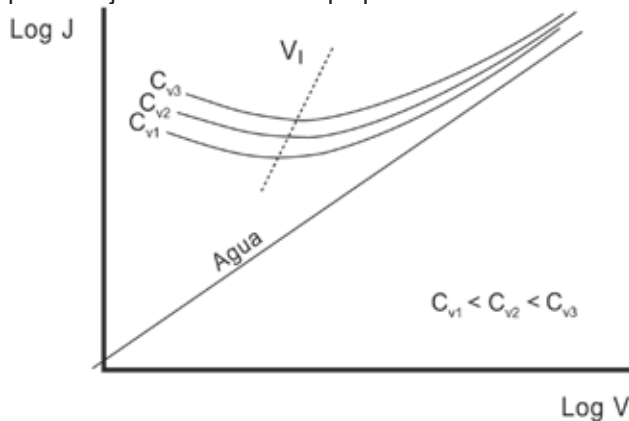
El incremento puede alcanzar valores de hasta un 15%.

En los escasos estudios experimentales disponibles, generalmente no se considera la distribución granulométrica de las partículas sólidas, algunos no toman en cuenta la influencia

del ángulo de inclinación de la tubería. En otros, la pérdida de carga de la pulpa está dada en metros de agua y para el análisis de líneas gravitacionales debe transformarse a metros de pulpa, por último no consideran el efecto de pulido que provocan las partículas sólidas en la tubería, disminuyendo notablemente la pérdida de carga del agua pura

#### Pérdida de carga en tuberías

La relación entre la resistencia de una pulpa y el contenido de agua varía de acuerdo al porcentaje de sólidos de la pulpa tal como lo indica la Figura 37:



**Figura 37: Relación entre la resistencia de una pulpa y el agua**

El aumento de velocidad relativo a una velocidad dada, implica un aumento en la energía gastada en mantener las partículas sólidas en suspensión.

El aumento de velocidad hace homogénea la suspensión y la mezcla tiende a comportarse como un líquido puro.

Al producirse la depositación, el choque de las partículas contra la pared provoca una disipación muy fuerte de energía y la pérdida de carga aumenta considerablemente aunque la velocidad de flujo disminuya. Se define la diferencia unitaria de pérdida de carga,  $\phi$ , como:

$$\phi = \frac{J_m - J_o}{C_v - J_o}$$

Donde:

- o Jm: pérdida de carga de la pulpa
- o Jo: pérdida de carga del agua
- o CV: concentración de sólidos en volumen

y es función de las siguientes variables:

- o Granulometría de la partículas
  - o Densidad relativa de la partículas
  - o Diámetro de la tubería
  - o Velocidad de flujo
- Desgaste de las tuberías, el desgaste que sufren inevitablemente las instalaciones de transporte hidráulico de sólidos tiene dos causas principales:
    1. La abrasión mecánica debido al choque continuo de las partículas sólidas contra la pared. Entre los factores que afectan la abrasividad de un flujo sólido - líquido se encuentran:
      - o Tamaño, a mayor tamaño lleva consigo mayor abrasividad
      - o Dureza, sólo se debe considerar lo concerniente al CaO crudo y al CaO requemado de la cal y las "arenillas o grancilla" que químicamente se generan.
      - o Densidad, que depende del CaO disponible que reaccionará con el agua para formar hidratos que son otros compuestos. Los residuos de los contenidos de CaO crudo y CaO requemado de la cal son incidentes en la abrasividad del flujo sólido.
      - o Forma de las partículas, no es muy relevante en la cal debido a que el CaO disponible reacciona con el agua formando  $\text{Ca(OH)}_2$ , expandiendo las partículas que adquieren el tamaño y forma del cristal de este último compuesto.
      - o Concentración de sólidos, generalmente para la cal se trabaja en valores que van desde el 10 al 15% en peso. A mayor concentración aumenta la abrasividad.
      - o Velocidad, a mayor velocidad mayor abrasión,
      - o Características geométricas y mecánicas de las líneas.

Las variables importantes a controlar para un sistema dado son:

- o La velocidad media de la mezcla
  - o Los cambios bruscos en la dirección del flujo. Éstos pueden controlarse de la siguiente manera:
    - Diseñando las curvas con radio amplio ( superiores a 50 diámetros)
    - Instalando protecciones antiabrasivas en codos y curvas
2. La corrosión electroquímica debido a la diferencia de potencial electroquímico entre la pulpa y el ducto, la que puede tener varias causas, entre otras:
- Presencia de oxígeno u otros gases en el flujo
  - Influencia catalítica de los reactivos
  - pH ácido
- o pH de la lechada, por la baja solubilidad de la cal y al estar en solución sobresaturada, esta variable es constante, 12,6
  - o Factor de forma de las partículas sólidas, sobretudo en las "arenillas o grancillas"
  - o Temperatura de la mezcla, para el caso de la cal, mayor temperatura implica menor solubilidad, por lo tanto, mayor concentración de sólidos

Más adelante se abordaran las diferentes formas de minimizar las incrustaciones. En la Figuras 38; 39; y 40 se muestran diagramas de flujos típicos para plantas de preparación de lechada de cal, a partir de cal viva molida.

### **El diagrama de flujo N° 1**

Esta alternativa (Figura 38) entrega la opción de preparar la lechada de cal en un estanque (de 12 m<sup>3</sup>) a partir de cal viva granulada o de cal hidratada. Considera dos estanques cuya capacidad individual es de 25 m<sup>3</sup>. Uno de ellos se destina para almacenamiento y envejecimiento y el otro para alimentación al proceso. Otorga la posibilidad de independencia de cada estanque en la alimentación de la cal al proceso, para facilitar la operación y mantención de los mismos.

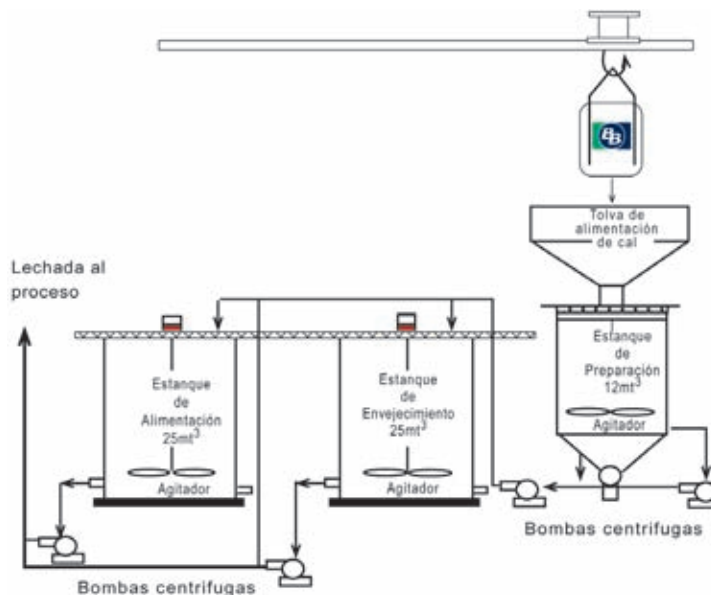


Figura 38: Diagrama de flujo N° 1 para preparar lechada de cal

## El diagrama de flujo N° 2

El diagrama de flujo de la Figura 39 permite preparar la lechada a partir de cal viva molida o cal hidratada. Considera un estanque de 12 m<sup>3</sup> de capacidad que se utiliza para la preparación y el envejecimiento y un estanque, de 25 m<sup>3</sup>, para alimentación al proceso. Esta opción presenta sólo una forma alternativa de alimentación de cal al beneficio del mineral.

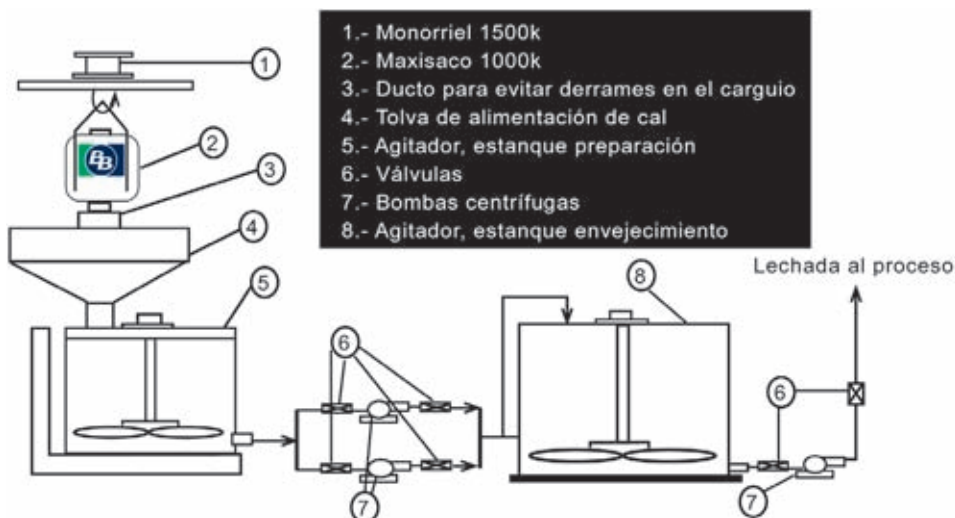


Figura 39: Diagrama de flujo N° 2 para preparar lechada de cal

### El diagrama de flujo N° 3

El diagrama de flujo de la Figura 40 es una alternativa ecológica, cuida el medio ambiente, es hermética y totalmente dinámica. Dependiendo del lugar de instalación, permite la alimentación de cal hidratada tanto sólida o como lechada. Involucra una tolva de alimentación, una rosca dosificadora, un mezclador para la preparación de la lechada y alimentación de la misma en forma inmediata al proceso, a través de una bomba centrífuga impulsora.

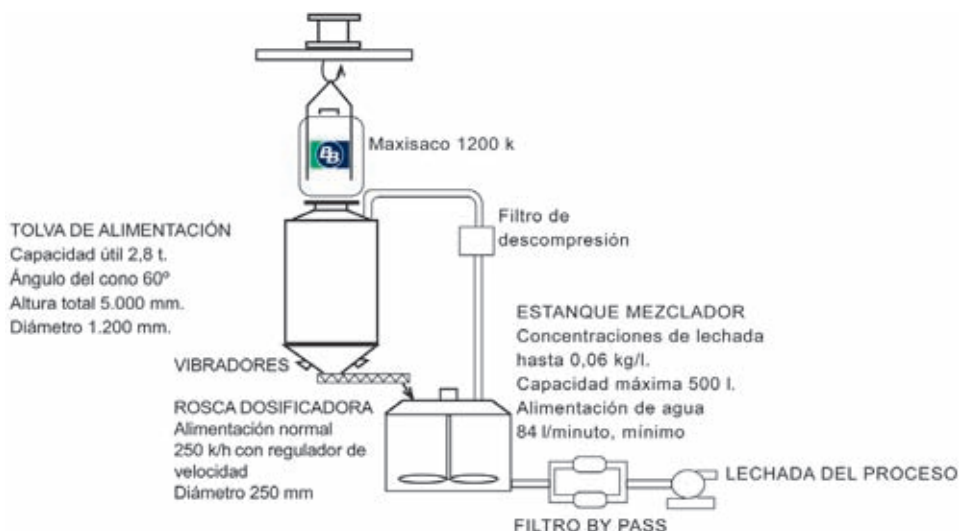


Figura 40: Diagrama de flujo N° 3 para preparar lechada de cal