

LA CAL: SUMIDERO NATURAL DE CARBONO

Ejemplos de carbonatación mineral
en aplicaciones de cal



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
LA CAL Y SUS APLICACIONES	4
EL CICLO DE LA CAL	6
EXPLORANDO LOS BENEFICIOS DE LA CARBONATACIÓN	8
EJEMPLOS DE CARBONATACIÓN EN APLICACIONES DE CAL	11
CONCLUSIÓN	14
ANEXOS	15
Acero	
Morteros de cal	
Cal con cáñamo	
Agua potable	
Tratamiento de gases de combustión	
Pasta y papel	
Aluminio	
DEFINICIONES	30
ACERCA DE EULA	32

INTRODUCCIÓN

Cada año se producen en Europa más de 20 millones de toneladas de cal en diversas formas. Como material abundante y multifuncional, la cal es necesaria para muchos procesos, desde la producción de hierro y acero al suministro de agua potable; actúa como agente purificante y captura la contaminación en los entornos industriales más extremos, al tiempo que resulta útil para el proceso de los alimentos y la mejora de los suelos. En otras palabras, la cal resulta esencial para la sociedad.

La producción de cal implica el calentamiento de la piedra caliza (CaCO_3) para transformarla en cal viva (CaO) de gran pureza, lo cual libera dióxido de carbono (CO_2) como parte de la reacción química; es lo que se denomina « CO_2 de proceso». Esto implica que la producción de cal es, de forma inherente, un proceso intensivo en carbono. El sector de la cal europeo (al que representa la Asociación Europea de la Cal, European Lime Association – EuLA) reconoce que tiene una importante función que desempeñar en la ambición de la Unión Europea de alcanzar la neutralidad climática para 2050 y está plenamente comprometido a la defensa de los objetivos del Pacto Verde [1].

El sector de la cal contribuye a esta transición desplazándose hacia combustibles con menos carbono y aumentando la eficiencia energética de los procesos de producción. Esto reducirá las emisiones debidas a la utilización de combustibles. Sin embargo, las emisiones de los combustibles son responsables de menos de un tercio de la cantidad total de CO_2 que se libera durante la producción. Las emisiones restantes son CO_2 de proceso

que no puede evitarse. Es necesario capturar el carbono y utilizarlo o almacenarlo para que la producción de cal alcance, en última instancia, la neutralidad en carbono de forma que evite la generación de las emisiones de CO_2 en su origen. Estas tecnologías continúan desarrollándose y en estos momentos no son viables desde el punto de vista comercial.

Y, sin embargo, hay una propiedad importante de la cal que todavía no se ha documentado ni implantado por completo a la hora de calcular la huella de carbono del sector de la cal: la cal captura el CO_2 desde la atmósfera cuando se convierte de nuevo en piedra caliza, un proceso natural conocido como carbonatación (o mineralización por carbonatación).

Algunos estudios muestran que, en aplicaciones tales como la purificación del agua potable, la tasa de carbonatación asciende al 100%, lo que implica que la cantidad total de CO_2 del proceso generado durante su producción se captura cuando esta cal se utiliza para producir agua potable. Este CO_2 se captura de forma permanente y no se libera a la atmósfera cuando la cal ha cambiado a piedra caliza, CaCO_3 .

En este documento, EuLA presenta los resultados de una revisión de las publicaciones disponibles realizada por el Instituto Politecnico di Milano (PoliMI) en la que se han tenido en cuenta los datos disponibles sobre las tasas de carbonatación en los diversos usos de la cal. Sus resultados muestran que, de media, el 33% de la cantidad de CO_2 de proceso emitido durante la producción de cal se captura por medio de la carbonatación.



LA CAL Y SUS APLICACIONES

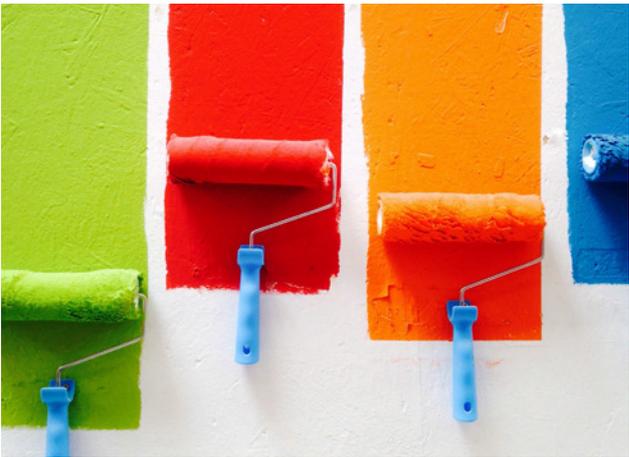
Un elemento posibilitador esencial

La cal es uno de esos productos que suelen pasar inadvertidos, pero que afectan profundamente a nuestras vidas cotidianas. Se usa en gran número de procesos industriales, incluyendo la fabricación de acero, la construcción, la industria alimentaria, la agricultura y muchas aplicaciones ambientales, por nombrar apenas algunas. Se ha usado a lo largo de toda la historia; los romanos, por ejemplo, usaron morteros de cal para construir su imperio. Hoy en día, su versatilidad y sus características únicas ayudan a las industrias de la construcción y la manufactura a optimizar sus productos y desempeña una función importante en la agricultura, la producción de alimentos y el tratamiento del agua.

En el sector de la construcción, la cal suele usarse en los morteros, donde se aprovecha su ductilidad cuando está húmeda y su carbonatación y endurecimiento naturales al convertirse en piedra caliza, un proceso especialmente valioso en la restauración de edificios históricos. Las formas modernas de morteros mezclan la cal con otros compuestos que aceleran la fijación. De forma similar, se usa una combinación de cal y el núcleo leñoso de las plantas de cáñamo para formar cal con cáñamo.

En muchas aplicaciones modernas se usa cal industrial como compuesto básico o alcalino para neutralizar la acidez o para captar las impurezas acídicas. Esto se da muy notablemente en la industria siderúrgica, en la que la cal se une a los elementos ácidos durante el proceso de fundición para eliminar impurezas mediante la formación de escoria. La cal se usó para tratar la lluvia ácida a finales del siglo pasado y continúa usándose para eliminar ácidos de los gases de combustión de las plantas eléctricas e industriales. Durante la producción de aluminio, la cal se usa en una mezcla cáustica para disolver la bauxita (mineral de aluminio).

La cal se usa para purificar y ablandar agua potable y para tratar las aguas y los lodos residuales. Para algunas aplicaciones, la cal se coloca en suspensión en el agua y se combina con CO_2 para elaborar distintas formas de lo que se conoce como carbonato cálcico precipitado (CCP); en esencia, piedra caliza purificada, que se usa como un pigmento o relleno en materiales tales como papel y pintura.



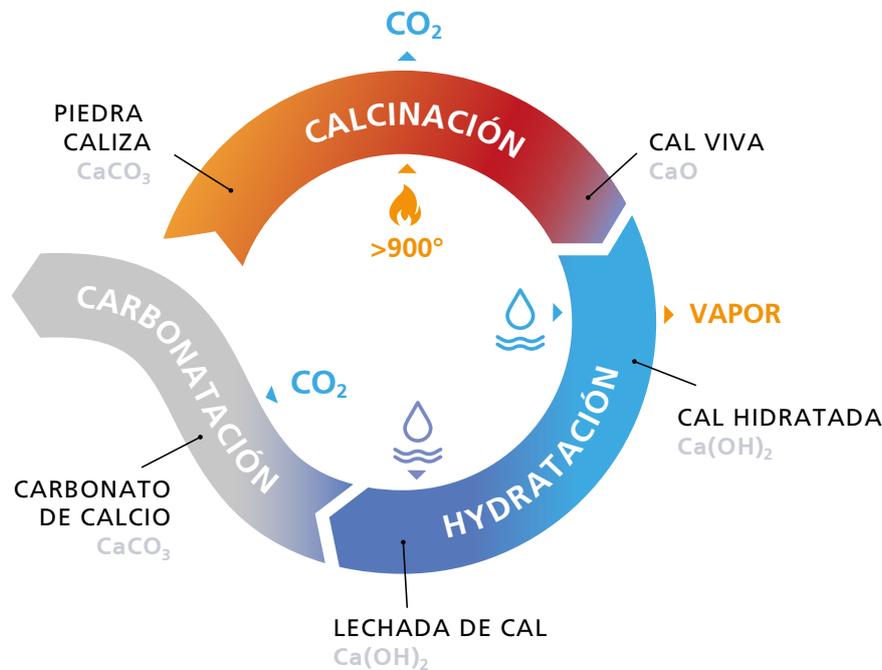


EL CICLO DE LA CAL

Estadios de los productos con cal

El ciclo de la cal es clave en sus muchas aplicaciones. Nos permite convertir la piedra caliza que obtenemos de las canteras como un recurso básico

en una familia diversa de productos entre los que se incluyen la cal viva, la cal apagada y su suspensión en agua, la lechada de cal. Cada uno de esos productos se usa de formas variadas distintas.



CO₂ de proceso

La producción de cal es un proceso rico en carbono debido a la liberación de CO_2 de la piedra caliza, lo que se denomina CO_2 de proceso. La quema de combustible para generar el calor necesario también emite CO_2 , que se denomina CO_2 de combustión. En general, el CO_2 de proceso es responsable de más de los dos tercios de las emisiones de CO_2 del sector de la cal europeo, mientras que el CO_2 de combustión apenas es responsable de un tercio. Aunque la emisión de CO_2 de combustión puede reducirse en la medida de lo posible cambiando a fuentes de energía con más neutralidad en CO_2 , esto no resulta posible en el caso de las emisiones de proceso, dado que son una parte inherente de la reacción química que produce la cal.

La cal como sumidero natural de carbono

La cal se convierte de modo natural en piedra caliza mediante la captura del CO_2 ambiente. Esto se denomina carbonatación y resulta esencial para muchos usos de la cal. Por ejemplo: los morteros que contienen cal capturan CO_2 de la atmósfera, que reacciona con la cal para producir cristales de carbonato de calcio. Este es el motivo por el que los morteros

de cal se endurecen con el tiempo. La cal pura se denomina con frecuencia cal aérea por que se fija con la atmósfera, en oposición a la cal hidráulica que se fija en el agua. Los cristales de carbonato de calcio son de mayor tamaño que la cal y se forman en los espacios disponibles, como grietas, y aumentan de tamaño, por lo que sellan las grietas. Esta característica autorreparante reduce la penetración del agua y aumenta la durabilidad de los morteros.

Tasa de carbonatación

La tasa de carbonatación de una aplicación describe la cantidad de CO_2 que se captura como porcentaje del CO_2 de proceso que se emite durante el proceso de elaboración. El tratamiento de agua potable (ablandamiento del agua), por ejemplo, tiene una tasa de carbonatación del 100%. En esta aplicación, la cal se expone intencionadamente al CO_2 para que forme un precipitado de carbonato cálcico. A medida que se precipita toda la cal presente en el agua, se captura una cantidad de CO_2 igual al CO_2 de proceso emitido durante su fabricación. En la producción de acero, la cal se usa para eliminar las impurezas, que no son CO_2 y, por lo tanto, esta aplicación tiene una menor tasa de carbonatación que la que se produce después del proceso de fabricación del acero mismo.



EXPLORANDO LOS BENEFICIOS DE LA CARBONATACIÓN

En los últimos años se han realizado y publicado muchos estudios sobre la captura permanente de CO₂ gracias a las propiedades de la cal. Para evaluar con exactitud la huella de carbono del sector de la cal, debemos tener en cuenta la cantidad de CO₂ que se captura mediante la cal cuando se usa en distintas aplicaciones. Esto exige datos sobre la tasa de carbonatación de todos los usos principales de la cal y sus porcentajes correspondientes del sector de la cal total.

Para responder a esta laguna en los datos, en 2018, EuLA encargó al Politecnico di Milano (PoliMI) que realizara una revisión de las publicaciones de investigación revisadas por expertos sobre la carbonatación de la cal [2]. PoliMI evaluó la carbonatación natural y mejorada (véase más adelante)

en diversas aplicaciones de cal, teniendo en cuenta la cantidad y fiabilidad de la información y de los datos disponibles.

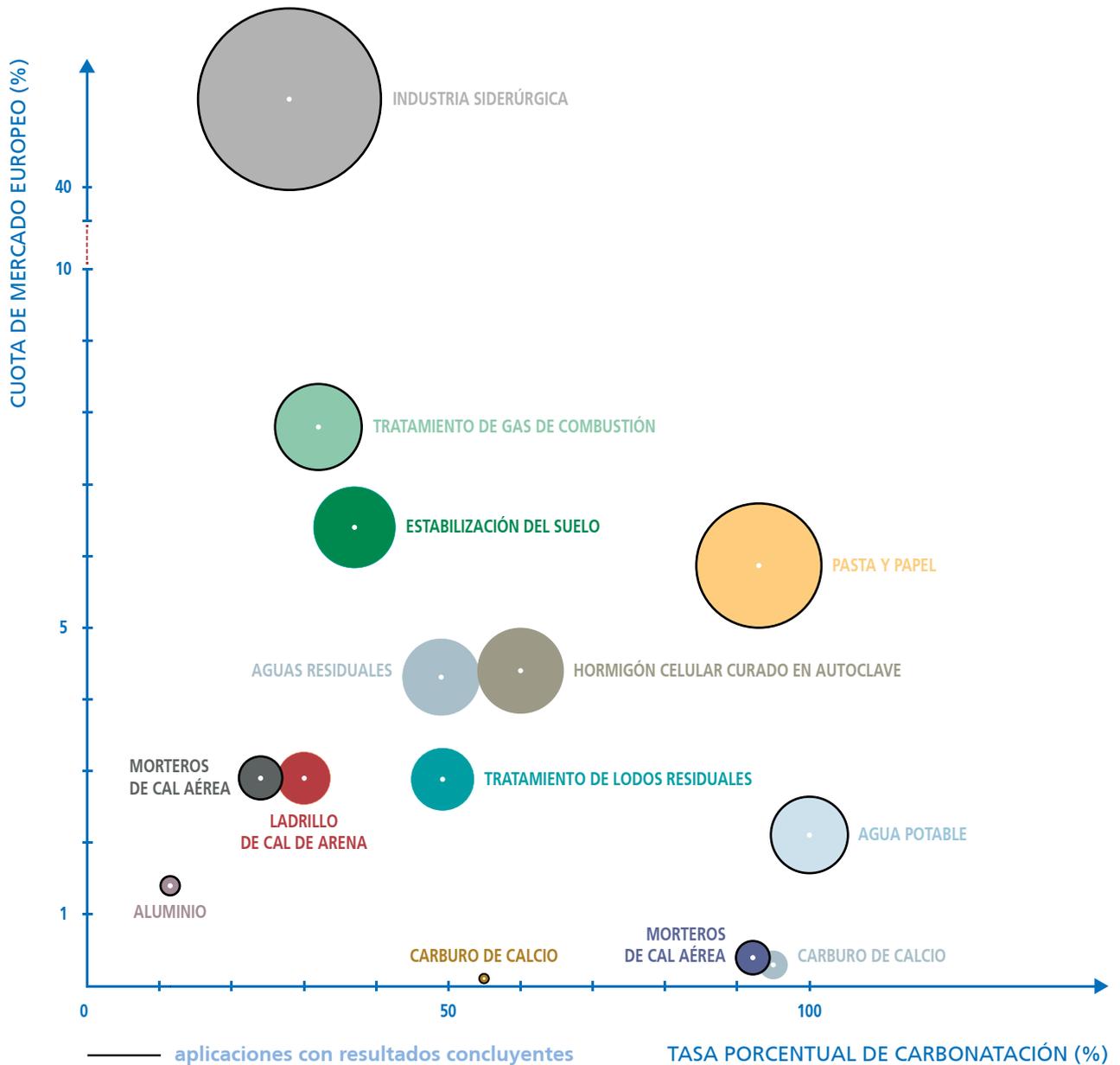
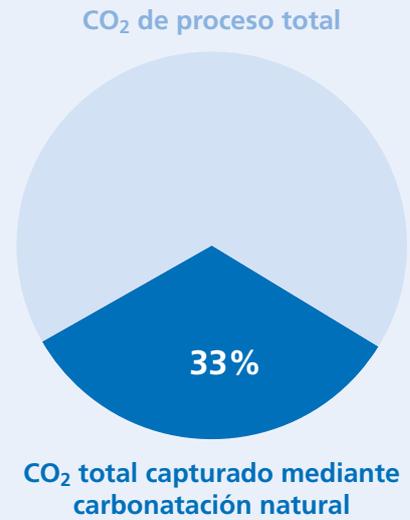
¿Qué sabemos con certeza?

Contamos con datos científicos concluyentes sobre la tasa de carbonatación en ocho aplicaciones; estas se conocen como aplicaciones concluyentes e incluyen los modos mayores usos de la cal: la fabricación de hierro y acero, y el tratamiento de gas de combustión. En conjunto, las ocho aplicaciones capturan el 23% de las emisiones totales de CO₂ de proceso de la producción de cal europea. Hay menos datos disponibles para seis aplicaciones frecuentes, pero indican que se captura un 10% adicional de las emisiones de CO₂ de proceso por cal en Europa.

La tasa de carbonatación natural del sector de la cal europeo podría ser, de media, del 33% de las emisiones de CO₂ de proceso que se generaron en un principio por la producción de cal.

La carbonatación natural de la cal captura una media del 33% de la cantidad de CO₂ de proceso emitido durante la producción.

El gráfico que se muestra a continuación evidencia la cantidad de CO₂ capturada por carbonatación natural. Para cada aplicación, el área del círculo representa la cantidad de CO₂ capturada como porcentaje del CO₂ de proceso total emitido durante la producción de cal para el mercado europeo.



Mejora de la carbonatación

La carbonatación se da de forma natural como resultado de la utilización de la cal. En algunos casos, es posible ajustar cómo se usa la cal para maximizar la tasa de carbonatación. Esto suele lograrse mejor maximizando el contacto entre la cal y el CO₂, tanto en el área de superficie, la concentración de CO₂, como modificando la presión y el tiempo. Otras opciones incluyen: la mejora de la eficiencia del proceso, el ajuste de la proporción de cal y reactivos o la minimización de las impurezas y el control de la humedad relativa, la acidez y la temperatura de la reacción.

PoliMI ha recopilado información que demuestra un potencial de carbonatación combinado de aproximadamente el 40% de las emisiones de CO₂ de proceso cuando se aplican técnicas de carbonatación natural y mejorada.

Marco temporal de la carbonatación

Cuando se usa cal en la purificación de los gases de combustión, para tratar el agua potable o en la producción de pasta y papel, la carbonatación sucede de forma instantánea. En la industria siderúrgica, la carbonatación se produce durante el almacenamiento al aire libre de la escoria, que suele durar entre 3 y 6 meses. La cal se usa en diversos materiales de construcción, como mortero y cal con cáñamo, que se carbonatarán durante la vida útil del edificio.

Aunque existen grandes diferencias en las escalas temporales de carbonatación para distintas aplicaciones, la mayoría de las reacciones de carbonatación se producen durante el primer año.

La carbonatación es permanente

La captura del CO₂ por medio de la carbonatación es permanente, dado que para volver a liberarlo se necesita una gran cantidad de energía térmica. En otras palabras, si no vuelve a convertirse en cal, el CO₂ se mantiene inmovilizado de forma permanente.

Por consiguiente, la cal puede considerarse como un sumidero permanente de carbono.





EJEMPLOS DE CARBONATACIÓN EN APLICACIONES DE CAL

En la página siguiente se muestran ejemplos de aplicaciones de cal cuya carbonatación se dispone de datos concluyentes en virtud de la detallada evaluación realizada por PoliMI [2]. Los anexos incluidos al final de esta publicación ofrecen más información sobre su trabajo. Las páginas que siguen describen la función que desempeña la cal en cada una de estas aplicaciones concluyentes y se indica cuándo y cómo se produce la carbonatación natural. Por cada aplicación, proporcionamos los datos que se indica a continuación:

- **Tasa de carbonatación:** el CO₂ capturado durante el uso, expresado como porcentaje del CO₂ de proceso emitido durante la fabricación de cal para esa aplicación.
- **Tasa de carbonatación aumentada:** indica las tasas de carbonatación que pueden conseguirse implantando medidas adicionales que tienen como objetivo específico maximizar la carbonatación.
- **Publicaciones relevantes:** la cantidad de publicaciones que contienen datos factibles para una aplicación, en comparación de la cantidad total de publicaciones evaluadas para esa aplicación.

SIDERURGIA



Uso: la cal neutraliza los elementos formadores de ácidos, elimina las impurezas, permite la escoria espumosa en HAE y protege los materiales refractarios

Carbonatación natural: se da durante el almacenamiento al aire libre de la escoria de acero durante 3-6 meses

Tasa de carbonatación: 5-28%

Tasa de carbonatación aumentada: 39-56%

Publicaciones relevantes: 55 de 72 evaluadas

CAL CON CÁÑAMO



Uso: la cal aérea se mezcla con cañamo triturado para crear ladrillos o forjar paredes, que se endurecen mediante carbonatación

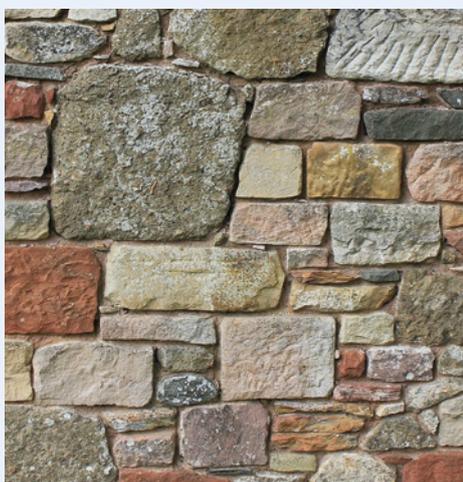
Carbonatación natural: durante la vida útil del edificio

Tasa de carbonatación: 55%

Tasa de carbonatación aumentada: 65%

Publicaciones relevantes: 9 de 15 evaluadas

MORTEROS DE CAL AÉREA



Uso: la cal aérea se mezcla con áridos para crear un mortero que se endurece mediante carbonatación para convertirse en piedra caliza

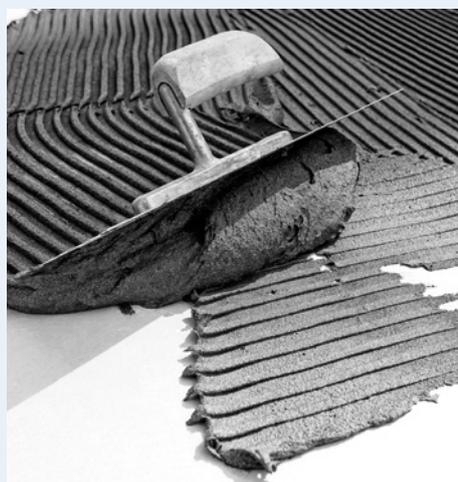
Carbonatación natural: durante toda la vida útil del edificio

Tasa de carbonatación: 80%

Tasa de carbonatación aumentada: 92%

Publicaciones relevantes: 21 de 100 evaluadas

MORTEROS DE CAL AÉREA MIXTOS



Uso: la cal aérea se mezcla con un coagulante y con áridos. La cal hidratada se convertirá mediante la carbonatación en piedra caliza, mientras que el coagulante inicia otra reacción, con frecuencia mediante hidratación

Carbonatación natural: durante toda la vida útil del edificio

Tasa de carbonatación: 20%

Tasa de carbonatación aumentada: 23%

Publicaciones relevantes: 27 de 90 evaluadas

AGUA POTABLE



Uso: la cal hidratada precipita el calcio, elimina las impurezas y regula la acidez

Carbonatación natural: el CO_2 se disuelve en agua en la forma de bicarbonatos y se precipita con el calcio

Tasa de carbonatación: 100%

Tasa de carbonatación aumentada: 100%

Publicaciones relevantes: 2 de 14 evaluadas

PURIFICACIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN



Uso: la cal hidratada reacciona con los gases ácidos de las emisiones de las plantas industriales

Carbonatación natural: la cal libre reacciona con el CO_2 de los gases de emisión

Tasa de carbonatación: 32%

Tasa de carbonatación aumentada: 59-64%

Publicaciones relevantes: 23 de 39 evaluadas

PASTA Y PAPEL



Uso: la cal hidratada se precipita en distintas formas de carbonato de calcio

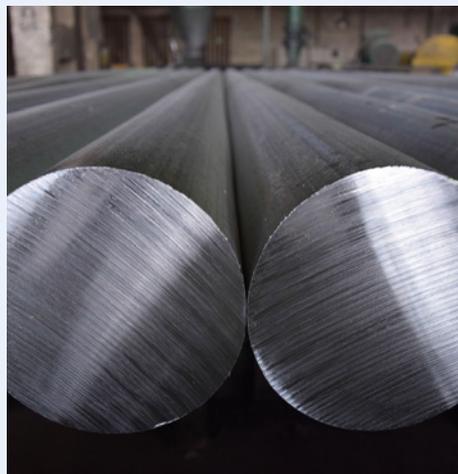
Carbonatación natural: se añade CO_2 durante el proceso para provocar la precipitación

Tasa de carbonatación: 93%

Tasa de carbonatación aumentada: 100%

Publicaciones relevantes: 26 de 41 evaluadas

ALUMINIO



Uso: la cal viva o la cal hidratada se usan en una mezcla para disolver la bauxita

Carbonatación natural: la cal libre reacciona con el CO_2 de la atmósfera durante el almacenamiento del residuo

Tasa de carbonatación: 12%

Tasa de carbonatación aumentada: 12%

Publicaciones relevantes: 13 de 52 evaluadas

CONCLUSIÓN

De media, el 33% de la cantidad de todo el CO₂ de proceso emitido durante la producción de cal en Europa se captura por medio de la carbonatación durante el uso y, utilizando algunas técnicas específicas, esta cantidad podría alcanzar incluso el 40%.

Es importante señalar que esta carbonatación se produce en gran parte durante el primer año.

Dado que este CO₂ se captura de forma permanente, este aspecto debe tenerse en cuenta a la hora de calcular la huella de carbono del sector.

Una definición clara y el tener en cuenta la función de la cal en la eliminación y el almacenamiento permanente del CO₂ permitirá al sector de la cal en Europa

ser un socio fuerte en la ambición compartida de una Europa neutral en carbono y competitiva dentro del mercado global.

EuLA está comprometida plenamente con la visión de una Europa neutral en carbono para 2050 y es consciente de que se necesitarán un marco regulador robusto e innovaciones tecnológicas. Creemos que la contabilidad correcta de la carbonatación que se produce mediante los usos generalizados de la cal forma una parte integral de este marco.

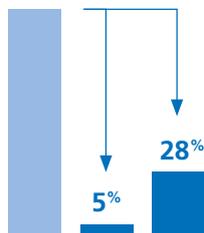
EuLA está realizando investigaciones para generar datos adicionales sobre la carbonatación natural y aumentada en las aplicaciones cuyos datos disponibles o cuya investigación científica no se prestan a unas conclusiones robustas. Esto permitirá una contabilidad todavía más detallada de la carbonatación resultante por el uso de la cal.

REFERENCIAS

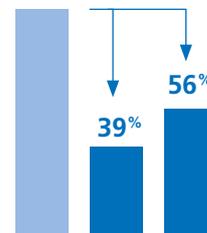
1. CE. 2019. Communication by the Commission on the green deal. COM(2019) 640 final. Bruselas. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu_en
2. Grosso M., Biganzoli L., Campo F. P., Pantini S., Tua C. 2020. Literature review on the assessment of the carbonation potential of lime in different markets and beyond. Report prepared by Assessment on Waste and Resources (AWARE) Research Group at Politecnico di Milano (PoliMI), for the European Lime Association (EuLA). Pp. 333.
3. Campo F.P., Tua C., Biganzoli L., Pantini S., & Grosso M. 2021. Natural and enhanced carbonation of lime in its different applications: a review. Environmental Technology Reviews.10:1. Pp. 224-237. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1982023>



ANEXOS



TASA DE CARBONATACIÓN NATURAL
AUMENTO GRADUAL CON EL TIEMPO



TASA DE CARBONATACIÓN AUMENTADA
AUMENTO GRADUAL CON EL TIEMPO

Tasa de carbonatación natural: del 5% al 28% (< 1 año) durante el almacenamiento de la escoria de acero.

Tasa de carbonatación aumentada: del 39% al 56% (< 5 años) durante el almacenamiento de la escoria de acero.

FACTORES QUE INCLUYEN SOBRE LA TASA DE CARBONATACIÓN

La carbonatación natural de la cal en la fabricación de acero se ve afectada por los siguientes factores:

- Área de superficie expuesta de las pilas de escoria de acero.
- Una porosidad baja de la pila de materiales impide el contacto con el CO₂.

La tasa de carbonatación aumentada se ve afectada por los factores siguientes:

- Composición de la escoria de acero.
- Tamaño de las partículas y área de la superficie en contacto con el CO₂.

Uso de la cal en la producción de hierro y acero

La presencia de compuestos de calcio en la escoria de acero es consecuencia del uso de cal (CaO) o de piedra caliza (CaCO₃) durante los procesos de elaboración de hierro y acero. La cal se usa en los procesos de desulfurización del metal caliente así como en los procesos de Horno de oxígeno básico (BOF) y Horno de Arco Eléctrico (EAF). Actúa como polvo de cobertura para crear una escoria alcalina que puede proteger los elementos refractarios, neutralizar los elementos que forman ácidos y eliminar las inclusiones de azufre, fósforo, sílice y alúmina. La cal también se usa en una

amplia variedad de procesos metalúrgicos secundarios para la eliminación de impurezas adicionales y para impedir la reabsorción de las impurezas de la escoria. Además, puede usarse junto con otros materiales, tales como el espato flúor, para formar una escoria sintética que se usa como fundente para eliminar azufre adicional durante el proceso de refinamiento del acero. En el proceso de producción de arrabio, la cal se usa con mucha menos frecuencia. Aquí se mezcla con piedra caliza en una proporción de 1:6, principalmente en el proceso de sinterización.

Proceso de carbonatación

La carbonatación natural se produce durante el almacenamiento al aire libre de la escoria de acero, a medida que la cal hidratada en la escoria Ca(OH)_2 reacciona con el CO_2 en la atmósfera. El Ca(OH)_2 es el resultado de la hidratación completa de la CaO libre que permanece en la escoria.

Esta hidratación es necesaria para el reciclaje de la escoria como material de construcción y tiene lugar por medio de la exposición al aire libre de las pilas de escoria, habitualmente durante un periodo de entre 3 y 6 meses. En el hierro, la carbonatación de escoria se considera insignificante, incluso después de 100 años.

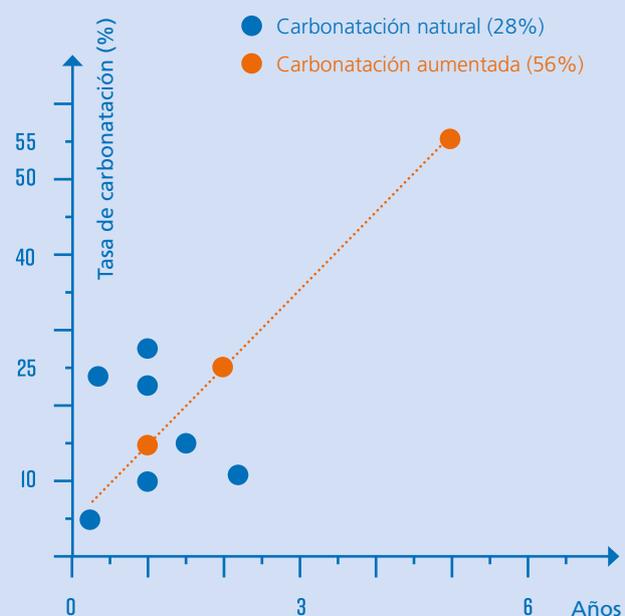
Marco temporal de la carbonatación

La carbonatación con el tiempo de la cal en la escoria de acero sigue la ecuación que se incluye a continuación.

Tasa de carbonatación

- Durante los primeros 5 años:
= $0,0085\sqrt{\text{número de días}}$.
- Después de los primeros 5 años: 39-56%.

De acuerdo con la ecuación, la tasa mínima de carbonatación aumentada del 39% se alcanza después de 5 años. El valor se sobrestima ligeramente, teniendo en cuenta que los 2/3 de la cal libre en la escoria de acero reaccionan durante los primeros 5 años, aunque la carbonatación de los silicatos y aluminatos de calcio tarda más de 5 años y alcanza un grado de carbonatación final de solo 1/3. Por consiguiente, puede considerarse el 39% como una tasa teórica de carbonatación natural máxima, que suele alcanzarse después de más de 5 años. Dado que la superficie de la pila de escoria es menos porosa una vez que se ha carbonatado, la difusión de CO_2 se reduce con el tiempo.



Escoria de acero

Publicaciones evaluadas: 72

Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 34

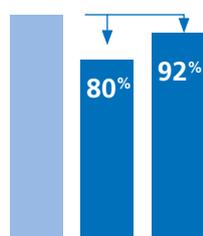
Escoria de hierro

Publicaciones evaluadas: 72

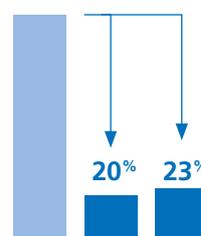
Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 21



MORTEROS DE CAL



MORTERO DE CAL ÁEREA
AUMENTO GRADUAL CON EL TIEMPO



MORTERO DE CAL ÁEREA MIXTO
AUMENTO GRADUAL CON EL TIEMPO

TASA DE CARBONATACIÓN NATURAL

La tasa de carbonatación natural se ve afectada por la profundidad del mortero. Se prevé que la cal se carbonatice desde 0 mm hasta 191 mm por debajo de la superficie del mortero a lo largo de 100 años.

Uso de cal como mortero

Los morteros de cal se han usado desde la antigüedad. **Los morteros de cal aérea** están compuestos por cal hidratada [Ca(OH)₂].

Los morteros de cal aérea mixtos son una mezcla de cal y otros compuestos para acelerar la fijación; por ejemplo, el cemento de Portland.

Proceso de carbonatación

Los morteros de cal aérea se endurecen como resultado de su exposición al CO₂ en la atmósfera y forman carbonato de calcio (CaCO₃). De esa forma, la carbonatación forma parte del proceso de endurecimiento y autocuración de los morteros

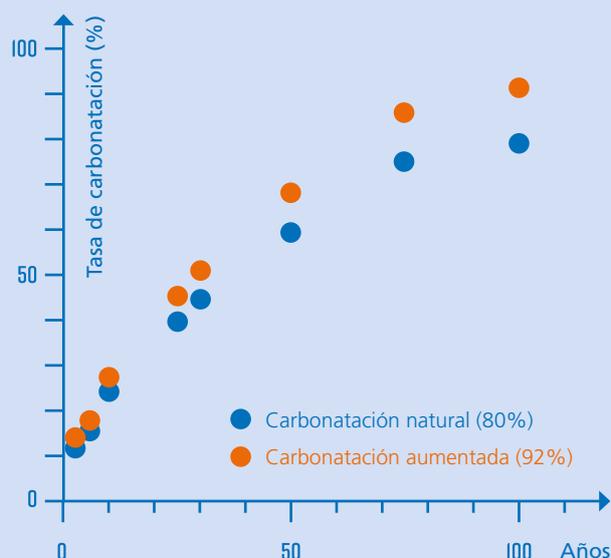
de cal aérea. **En los morteros de cal aérea mixtos** la cal hidratada se endurecerá mediante carbonatación a piedra caliza, mientras que el coagulante se endurece en otra reacción, con frecuencia mediante hidratación.

Marco temporal de la carbonatación para los morteros de cal aérea

La tasa de carbonatación natural con el tiempo para los morteros de cal aérea sigue la ecuación asumida:

$$[CR=NCR \cdot K \sqrt{t}/\text{profundidad}]$$

- **CR** = tasa de carbonatación (%).
- **NCR** = tasa de carbonatación natural (80%).
- **t** = tiempo expresado en días.
- **K** = constante de carbonatación igual a 1 mm/ $\sqrt{\text{día}}$.
- **profundidad** = espesor de la aplicación que se carboniza después de 100 años (191 mm).

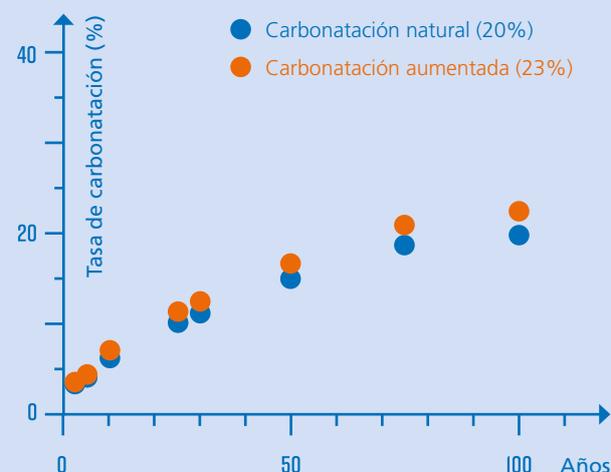


Marco temporal de carbonatación para los morteros de cal aérea mixtos

La carbonatación natural en los morteros de cal aérea mixtos se ve afectada para la tasa de sustitución del cemento Portland, que reduce la porosidad. Esto, a su vez, reduce la tasa de carbonatación a una cuarta parte de la obtenida por los morteros de cal aérea. Ecuación asumida:

$$[CR=NCR \cdot K \sqrt{t}/\text{profundidad}]$$

- **CR** = tasa de carbonatación (%).
- **NCR** = tasa de carbonatación natural (20%).
- **t** = tiempo expresado en días.
- **K** = constante de carbonatación igual a 0,25 mm/ $\sqrt{\text{día}}$.
- **profundidad** = espesor de la aplicación que se carboniza después de 100 años (191 mm).



Mortero de cal aérea

Publicaciones evaluadas: 100

Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 21

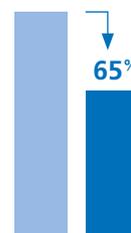
Mortero de cal aérea mixto

Publicaciones evaluadas: 90

Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 27



TASA DE CARBONATACIÓN NATURAL
AUMENTO GRADUAL CON EL TIEMPO



TASA DE CARBONATACIÓN AUMENTADA
AUMENTO GRADUAL CON EL TIEMPO

La tasa de carbonatación se ve afectada por los factores siguientes:

- Composición del aglutinante.
- Contacto con el CO₂.

Uso de cal con cáñamo como material de construcción

Los materiales de construcción con cal con cáñamo se usan principalmente en Francia y en el Reino Unido, países de donde proceden la mayoría de las publicaciones. Los materiales de cal con cáñamo se elaboran con cañamiza, el núcleo

leñoso troceado de los tallos de la planta de cáñamo. Se mezcla con un aglutinante de cal aérea con aditivos de cal cementosa o hidráulica puzolánica y, en algunos casos, materiales tensoactivos.

Proceso de carbonatación

El aglutinante de cal aérea es la cal hidratada [Ca(OH)₂]. Durante la fase de uso del material de construcción de cal con cáñamo, la cal hidratada se carbonata reaccionando con el CO₂

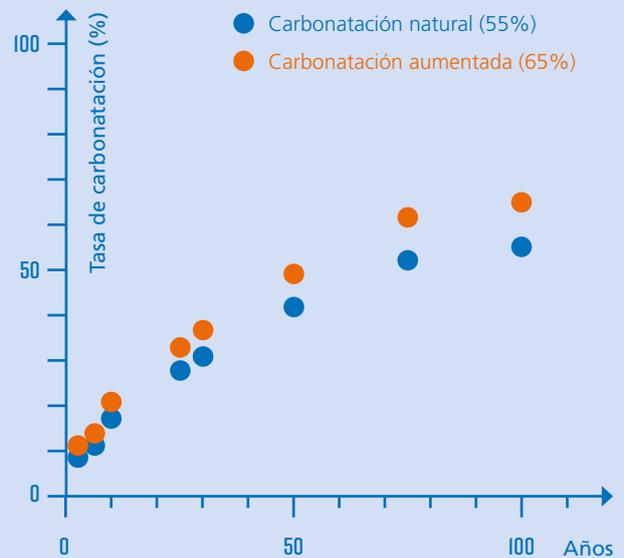
en la atmósfera y forma carbonato cálcico (CaCO₃). La revisión de las publicaciones muestra que la tasa de carbonatación es del 55%.

Marco temporal de la carbonatación

Esto se produce a una profundidad de 50 mm, en la que la cal está totalmente carbonatada después de 91 días. Por consiguiente, la constante de carbonatación que mide el avance de la profundidad de carbonatación en el tiempo es igual a 5,24 mm/ $\sqrt{\text{día}}$ dado el cociente de 50 mm entre la raíz cuadrada de 91 días. La tasa de carbonatación natural en el tiempo para la cal con cáñamo sigue la ecuación asumida:

$$[CR = NCR \cdot K \cdot \sqrt{t} / \text{profundidad}]$$

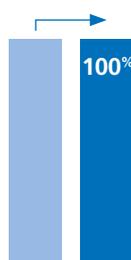
- **CR** = tasa de carbonatación (%).
- **NCR** = tasa de carbonatación natural (55%).
- **t** = tiempo expresado en días.
- **K** = constante de carbonatación igual a 5,24 mm/ $\sqrt{\text{día}}$.
- **profundidad** = espesor de la aplicación que se carboniza después de 100 años (1001 mm).



Cal con cáñamo

Publicaciones evaluadas: 15

Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 9



**TASA DE CARBONATACIÓN NATURAL
INSTANTÁNEA**

La tasa de carbonatación se ve afectada por los factores siguientes:

- Baja solubilidad del carbonato de calcio y del hidróxido de magnesio.
- Adición de coagulantes y agentes floculantes para acelerar el proceso.
- Adición de partículas finas inertes, como arena o CaCO_3 que se ha precipitado con anterioridad, para que hagan las veces de centros de nucleación, lo que aumenta la velocidad de la reacción.

Uso de cal para el tratamiento del agua potable

La cal se usa en el sector del agua potable para muchas aplicaciones, tales como el ablandamiento, el ajuste del pH, la neutralización de los ácidos, la eliminación de los metales, el ajuste de la alcalinidad o la eliminación de fluoruro, fosfato, sulfato y nitrógeno. Una de las principales

aplicaciones es el ablandamiento del agua, con el que se pretende reducir la dureza del agua no tratada (por ejemplo, los bicarbonatos de calcio y magnesio), reducir la alcalinidad y eliminar la sílice para evitar los efectos indeseables de las incrustaciones o depósitos.

Proceso de carbonatación

El agua dura se ablanda usando cal hidratada [Ca(OH)₂] para precipitar el calcio y el magnesio disueltos como carbonato de calcio e hidróxido de magnesio, ambos insolubles. Después de la sedimentación, estos compuestos insolubles se eliminan mediante filtración. La cal usada

en el ablandamiento del agua se considera totalmente carbonatada, dado que en el producto derivado que se obtiene están ausentes el CaO y el Ca(OH)₂ y que el calcio que contiene está en forma de carbonato (CaCO₃).

Marco temporal de la carbonatación

La tasa de carbonatación natural en el tiempo para el agua potable no se notifica en las publicaciones evaluadas. Se supone que es instantánea, es decir,

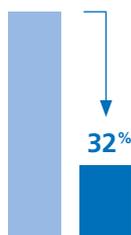
que el 100% de la cantidad de emisiones de proceso se absorben durante la fase de tratamiento para la aplicación de agua potable.

Agua potable

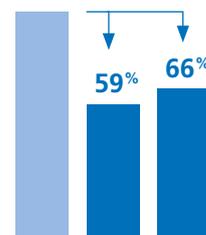
Publicaciones evaluadas: 14

Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 2

TRATAMIENTO DE GASES DE COMBUSTIÓN



TASA DE CARBONATACIÓN NATURAL INSTANTÁNEA



TASA DE CARBONATACIÓN AUMENTADA INSTANTÁNEA

La tasa de carbonatación se ve afectada por los factores siguientes

- Las características del gas de combustión (composición, temperatura...).
- La formación de una capa externa de compuestos de calcio, que se caracterizan por una baja porosidad, lo cual inhibe la difusión del CO₂.
- El proceso de tratamiento de gas de combustión influye sobre la tasa de carbonatación: un diseño óptimo puede producir una dosis específica más elevada de eliminación de ácidos (cociente estequiométrico más elevado); esto aumenta la posible reacción con el CO₂ del gas de combustión y, por consiguiente, la carbonatación natural.

La tasa de carbonatación se ve afectada por los factores siguientes:

- Temperatura:
 - 20-30 °C en la carbonatación acuosa,
 - superior a 350 °C para la carbonatación de gas a sólido.
- Razón entre líquido y sólido para la carbonatación con base acuosa:
 - 0.2-0.3 L/S de razón entre líquido y sólido para una carbonatación óptima.
- Presencia de SO₂:
 - el SO₂ taponará los poros en el residuo de control de la contaminación ambiental y reducirá la carbonatación.

Uso de la cal en el tratamiento de los gases de combustión

La cal se usa para la eliminación de los gases ácidos (HCl, SO_x, HF) que contienen los gases de chimenea generados en las plantas de combustión: plantas eléctricas a partir de combustibles fósiles, combustión de biomasa e instalaciones de incineración de residuos. Un proceso de tratamiento de gases de combustión puede ser semiseco o seco, dependiendo de la forma de cal que se utilice.

En los procesos (semi)húmedos, la cal se suministra como una solución acuosa o suspensión, es decir, lechada de cal o como lodo de cal [Ca(OH)₂].

Durante la reacción con el gas de combustión en los procesos húmedos, la reacción produce un lodo que debe tratarse. En los procesos semihúmedos, el agua se evapora y los productos de la reacción son secos. En los procesos (semi)secos, se suministra polvo de cal hidratada [Ca(OH)₂] para que actúe directamente como absorbente. En ambos procesos, los productos de la reacción se separan en una unidad de eliminación de partículas tradicional (habitualmente, una cámara de filtros).

Proceso de carbonatación

Durante el tratamiento de los gases de combustión, la cal no solo reacciona con HCl, HF y SO_x, sino también con el CO₂, para formar carbonato cálcico.

Debido a la brevedad del contacto entre la cal absorbente y el gas contaminante, que suele ser de apenas algunos segundos, y a los límites cinéticos de las reacciones químicas, la cal se suministra en exceso a los gases ácidos previstos, habitualmente en una relación estequiométrica de 1,3 a 2,5. Como resultado, los residuos sólidos generados por el proceso, que se conocen como Residuos

de Control de la Contaminación Ambiental (RCCA), contienen algunas cantidades de cal libre que puede someterse a carbonatación.

La carbonatación aumentada de los RCCA se ha propuesto principalmente como una tecnología para mejorar su estabilidad química y su conducta de lixiviación antes de su desecho final o de su reciclado. Además, la carbonatación aumentada de los RCCA permite el secuestro directo del CO₂ contextual en un punto de emisión de CO₂ en el que se generan estos residuos.

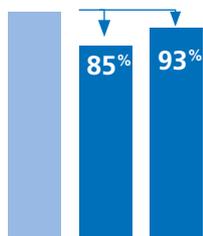
Tratamiento de gases de combustión

Publicaciones evaluadas: 39

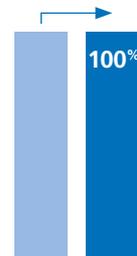
Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 23



PASTA Y PAPEL



TASA DE CARBONATACIÓN NATURAL
INSTANTÁNEA



TASA DE CARBONATACIÓN AUMENTADA
INSTANTÁNEA

La tasa de carbonatación se ve afectada por los factores siguientes:

- La tasa de disolución del hidróxido de calcio en el lodo.
- La presurización de la reacción de carbonatación.
- El uso de aditivos específicos.

Uso de la cal en la producción de pasta y papel

El carbonato de calcio precipitado (CCP) se usa en su mayor parte como un pigmento de revestimiento o relleno en la industria de pasta y papel, pero también se usa en otras aplicaciones industriales. El CCP se produce químicamente combinando dióxido de carbono (CO_2) con cal (CaO) en condiciones de funcionamiento controladas. El lodo de cal hidratada se pone en contacto con los gases de combustión que contienen CO_2 , lo cual lleva a la recarbonatación de la cal. De esa manera, vuelve a formarse carbonato cálcico y, dado que es insoluble en agua, se precipita.

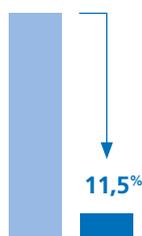
La separación de las impurezas del lodo de cal se usa para garantizar un CCP de gran pureza.

La precipitación puede producir cualquiera de las tres formas cristalinas (calcita, aragonita y vaterita), dependiendo de las condiciones de la reacción. Las características de los CCP pueden adaptarse regulando lo siguiente: la temperatura, la concentración y el flujo de CO_2 , la velocidad de agitación, el tamaño de las partículas, la concentración del lodo de cal hidratada y el uso de aditivos.

Pasta y papel

Publicaciones evaluadas: 52

Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 13



TASA DE CARBONATACIÓN NATURAL
EN LAS PUBLICACIONES EVALUADAS NO SE INDICA EL MARCO TEMPORAL

La carbonatación natural se ve afectada por los siguientes factores:

- La composición del lodo rojo.
- El tiempo de exposición desde la disolución de los minerales con Ca que suelen estar presentes en el lodo rojo.
- La cantidad de agitación durante el almacenamiento del lodo rojo y, en consecuencia, la cantidad de superficies expuestas al CO₂ atmosférico.

Uso de la cal en la producción de aluminio

La cal se utiliza en el proceso de Bayer, el medio principal de refinar el mineral de bauxita para la extracción de alúmina. Durante el proceso de Bayer, la bauxita se digiere en un licor cáustico en el que se incluye la cal. Este proceso produce dos vías de producto: un licor rico en alúmina que se usa para la posterior producción de aluminio y un residuo sólido, que se llama lodo rojo, para desecho. Este residuo para desecho

es un lodo alcalino con un contenido de agua aproximado de entre el 50% y el 70%, y un pH que suele ser superior a 13. El tratamiento del desecho del lodo rojo consiste en la actualidad en su apilamiento en seco para que se espese hasta que alcanza un contenido sólido de al menos el 48-55%. El lodo rojo espesado se conserva entonces de tal modo que se consolida y se seca.

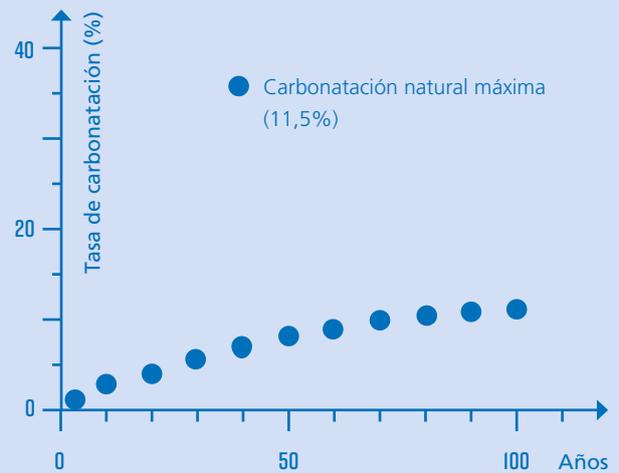
Proceso de carbonatación

La carbonatación natural del lodo rojo implica tanto la carbonatación del agua capilar como reacciones de fase sólida del aluminato tricálcico (ATC) y la precipitación de la calcita.

Para neutralizar el lodo, reduciendo su pH, se proponen distintos métodos de neutralización por medio de agua del mar o tecnologías que usan salmueras artificiales ricas en Ca y Mg. Otra neutralización se basa en el CO₂, es decir, una carbonatación en condiciones aceleradas.

Marco temporal de la carbonatación

El marco temporal para la carbonatación no se notifica en las publicaciones evaluadas. Se considera que el peor caso hipotético sería que la carbonatación ocurriera en un período de 100 años. Este gráfico ofrece una representación estimada de esta suposición.



Producción de aluminio

Publicaciones evaluadas: 41

Publicaciones con información y datos relevantes y fiables: 26

DEFINICIONES

MORTEROS DE CAL AÉREA

En la mayoría de las aplicaciones de materiales de construcción, incluyendo morteros, enlucidos y escayolas, se usa el hidróxido de calcio, que se conoce como cal hidratada o cal apagada. Se endurece con lentitud al reaccionar con el dióxido de carbono de la atmósfera para volver a formar carbonato cálcico, una reacción que se conoce como carbonatación. La cal con estas características se conoce como cal aérea, porque solo reacciona con aire.

CALCINACIÓN

Hace referencia al calentamiento de la piedra caliza o de otras piedras compuestas en su mayor parte de carbonato cálcico (CaCO_3) para producir cal viva o cal ordinaria, es decir, óxido de calcio (CaO). Durante la descomposición térmica (calcinación) del CaCO_3 se producen dos productos: CaO y CO_2 .

SUMIDERO DE CARBONO

Hace referencia a los sistemas naturales que absorben y almacenan dióxido de carbono de la atmósfera.

CAL CARBONATADA

Parte de la cal que se ha transformado en CaCO_3 (carbonatos) por medio de la reacción con el dióxido de carbono (CO_2).

CONSTANTE DE CARBONATACIÓN (K)

Parámetro de la ecuación que expresa la progresión de la carbonatación por su profundidad en relación con el tiempo (t) para los materiales de construcción: profundidad de carbonatación = $K\sqrt{t}$.

PROFUNDIDAD DE LA CARBONATACIÓN

Distancia desde la superficie de la cal hasta el lugar en el que la cal no está carbonatada o lo está en muy pequeña proporción. Se mide a través de la prueba de solución de fenoltaleína y se expresa en mm.

TASA DE CARBONATACIÓN

Relación porcentual entre la cantidad de CO_2 que se absorbe durante la carbonatación y la cantidad de CO_2 de proceso que se emite durante la calcinación.

CARBONATACIÓN AUMENTADA

Proceso por el cual se favorece la carbonatación en mejores concentraciones de dióxido de carbono o mediante la optimización de parámetros de proceso tales como la temperatura, la humedad relativa, el área de reactividad de la superficie, el pH y otros, dependiendo de la matriz de reacción en las fases sólida, líquida o gaseosa. Por consiguiente, se reduce el tiempo necesario para la carbonatación.

GASES DE COMBUSTIÓN

Gas que se genera en las plantas de combustión, en particular en las plantas eléctricas que queman carbón y en las instalaciones de incineración de residuos que contienen una cantidad importante de gases ácidos (HCl , SO_x , HF). La eliminación de los gases ácidos puede realizarse usando distintos agentes alcalinos, como la cal, la piedra caliza y otros. Esta aplicación también se conoce como desulfurización del gas de combustión (DGC) o limpieza del gas de combustión (LGC).

CAL CON CÁÑAMO

Es un material de construcción que se elaboró en un principio en sustitución del relleno de cañizo troteado en los edificios con entramado de madera. Los componentes de la cal con cáñamo son la cañamiza, el núcleo leñoso triturado de los tallos de la planta de cáñamo (*Cannabis sativa*), el aglutinante de cal aérea con aditivos de cal de cemento o hidráulica puzolánica y, en algunos casos, materiales tensoactivos.

HIDRATACIÓN

Hace referencia al proceso de adición de agua a la cal viva para formar hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, el producto de la reacción entre la cal viva y agua.

CAL

Término usado de forma generalizada para hacer referencia tanto a la cal viva como a la cal apagada.

MORTEROS DE CAL AÉREA MIXTOS

Hoy es habitual incorporar un aglutinante, como cemento de Portland, a las mezclas de mortero. Esto ofrece una ganancia rápida de fuerza inicial, lo cual permite un progreso rápido en la construcción. La cal (normalmente, cal hidratada) se incluye en estas mezclas para ofrecer mejor durabilidad a largo plazo y rendimiento global de la albañilería; esto se conoce como aplicaciones de morteros de cal aérea mixtos.

CARBONATACIÓN NATURAL

Proceso por el cual la cal reacciona de forma espontánea con el dióxido de carbono para producir carbonato cálcico (CaCO_3) que lo almacena de forma permanente. La reacción es exotérmica y, por consiguiente, termodinámicamente favorable. Dependiendo de la matriz de reacción, sólida, líquida o gaseosa, el CO_2 puede proceder de la atmósfera, del agua o de cualquier otra fuente.

 CO_2 DE PROCESO

CO_2 que se libera por la descomposición de CaCO_3 en CaO y CO_2 . Cuando se hace referencia a CO_2 de proceso, la liberación de CO_2 procedente de la combustión de combustibles no se tiene en cuenta, dado que esta depende en gran medida del tipo de energía utilizada.

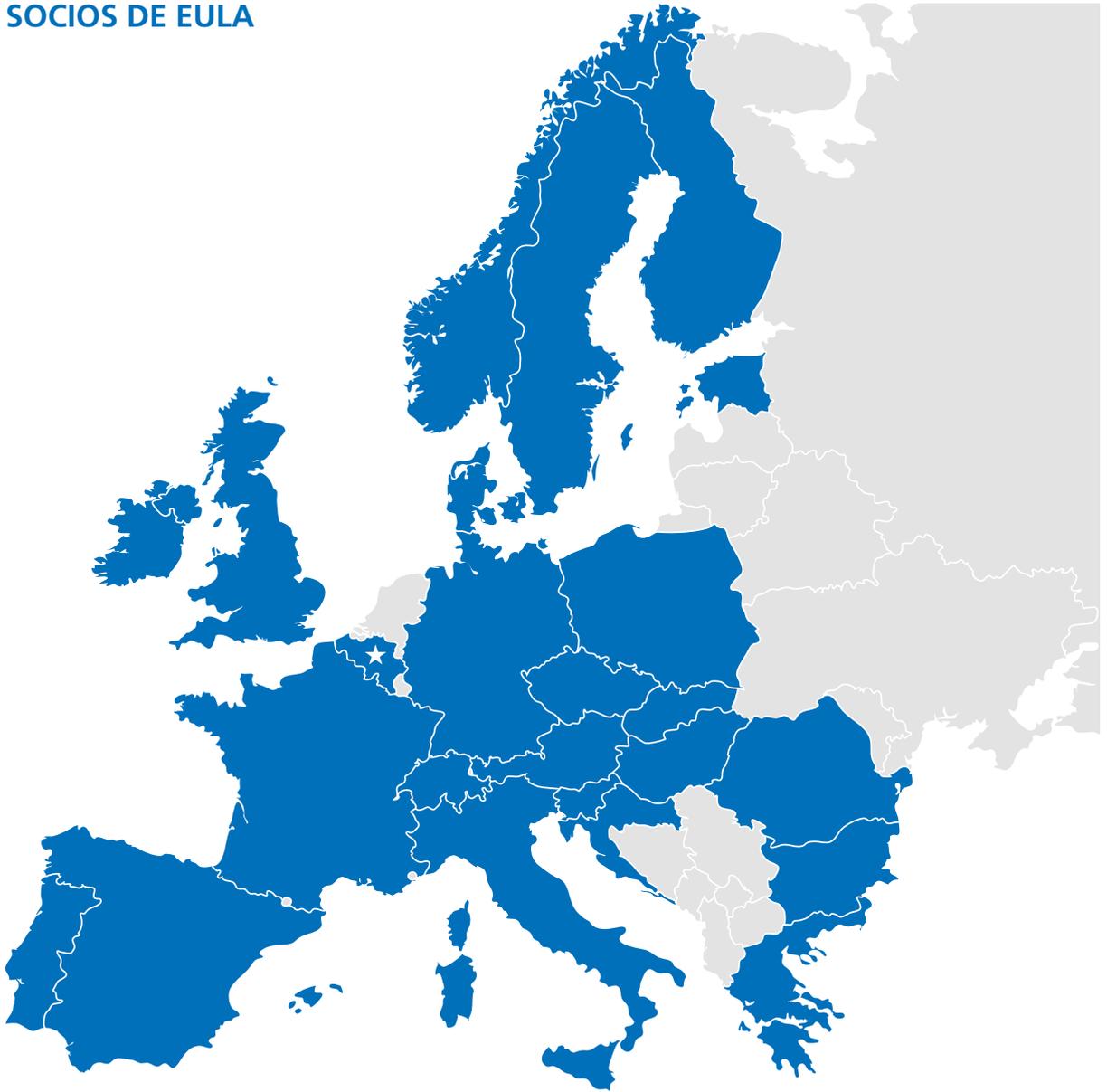
CAL VIVA O CAL ORDINARIA

Óxido de calcio (CaO) producto de la calcinación.

CAL APAGADA O CAL HIDRATADA

Hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, producto de la reacción entre la cal viva y el agua.

SOCIOS DE EULA



La Asociación Europea de la Cal respalda hacer realidad la visión del sector de la cal. Existe para defender los intereses de los productores europeos de cal a nivel europeo y para respaldar los objetivos nacionales de sus socios impulsados por una única voz. EuLA forma parte de la asociación IMA-Europa (Asociación de Minerales Industriales de Europa, Industrial Minerals Association Europe).



European Lime Association
c/o IMA-Europe
Rue des Deux Eglises, 26
1000 Brussels, Bélgica
info@eula.eu | www.eula.eu