

Artigo 16: Carbonatación como alternativa de valorización de residuos para el desarrollo de modelos de economía circular

Jorge Molina Beltrán, Universidade Internacional do Cuanza

jorge.molina@unic.co.ao

Monserrat Fernanda Miranda Ramírez, Universidade de Santiago de Chile

monserrat.miranda.r@usach.cl

Morayma Cazull Imbert, Universidade Internacional do Cuanza

morayma.imbert@unic.co.ao

Resumen

La ponencia fundamenta el desarrollo de modelos de economía circular que potencian mantener el valor de uso de los materiales y los productos el mayor tiempo posible; disminuye así, los impactos y aspectos ambientales incidentes en el cambio climático, fortalece la gestión de residuos y las afectaciones a la biodiversidad producto de la actividad humana. Se justifica mediante métodos científicos de investigación que los procesos de valorización de residuos aportan la real alternativa para el reuso de los residuos que, bajo el concepto tradicional de reciclaje, no tendrían alternativa de revalorizarse nuevamente. Se demuestra mediante el proceso de carbonatación, como tecnología, su pertinencia para revalorizar los residuos, se logran nuevos materiales y se disminuye su impacto directo en la disminución del CO₂ emitido a la atmósfera. Mediante la propuesta se simulan las condiciones de formación de minerales de origen epitermal, lo que resulta en la formación de carbonatos estables, que confieren nuevas propiedades y características deseables a los residuos tratados. La propuesta se recomienda junto a otras tecnologías para la valorización de los residuos por su actualidad y posibilidades reales de aplicación.

PALABRAS CLAVES: economía circular, gestión ambiental, reciclaje, valorización material, valorización de residuos, carbonatación.

Introducción

El avance de un país en su desarrollo ambiental, parte en un principio por enfrentar los primeros problemas de saturar el mediobiente y sobrepasar su capacidad de reacción, lo que luego de pasada y normalizada esta situación, nace la necesidad de avanzar e intentar regular y minimizar los impactos ambientales de la actividad humana, en especial el control de las emisiones finales, las cuales en la actualidad con las nuevas tendencias de la economía circular, ha levantado y dado fuerza a conceptos en la jerarquización de la gestión de residuos, dejando en el último lugar la disposición final, la cual años atrás era el camino lógico para elementos que su poseedor habría ya descartado su uso.

Es en esta misma jerarquización que aparecen distintos niveles en la jerarquización, que en su práctica se ordenan por sus impactos al medio como es evitar generar residuos, reusar, reciclar y luego valorizar, como último medio de obtener algún valor de los residuos y que es objetivos de este trabajo.

En el campo de la industria minera, uno de los desafíos más apremiantes que enfrentamos en la actualidad es la gestión efectiva de los residuos generados por las actividades mineras, que en la actualidad se combina con la necesidad de reducir las emisiones de carbono. Estos residuos, considerados en muchas ocasiones como simples remanentes del proceso productivo, plantean un desafío significativo en términos de manejo responsable y minimización de su impacto ambiental, puesto que, en ellos se encuentra gran parte de la energía embebida del procesamiento del cobre, dado que, este se encuentra en bajas concentraciones, valores menores al 1%, como es el caso del Cobre, siendo necesario procesar el 99%, restante para su extracción y beneficio.

En respuesta a esta problemática, la carbonatación de residuos minerales ha surgido como una alternativa innovadora y prometedora, recuperada de aplicaciones del pasado, que abre una serie de puertas ambientales favorables para fabricación de materiales de construcción con menor huella de carbono. Este proceso químico involucra la reacción de los residuos mineros con dióxido de carbono (CO₂), lo que resulta en la formación de carbonatos estables. Además, de conferir nuevas propiedades y características deseables a los residuos minerales, la carbonatación también ofrece la posibilidad de reducir su impacto ambiental al capturar y almacenar el CO₂.

El cambio climático es otro factor de gran relevancia en la actualidad, conscientes de la

urgencia de abordar este desafío global, se han establecido acuerdos internacionales como el Protocolo de Kioto, que buscan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En este contexto, la carbonatación de residuos minerales no solo se presenta como una solución para el manejo de residuos mineros, sino que también como una estrategia para contribuir a la reducción de las emisiones de GEI, al capturar y almacenar el CO₂ en los materiales resultantes. Dicho protocolo fue el primer intento por minimizar las emisiones de carbono, siendo el acuerdo de Paris, el que genera una serie de avances en investigación, innovación y aplicaciones de tecnologías para una real minimización de estas emisiones, lo anterior fue posible, ya que, no solo se exige la disminución, sino la captura y reemplazo de materiales, que en su construcción utilizan menor cantidad de carbono. Surge así la idea de reutilizar materiales que ya han sido tratados o procesados, lo que implica una nueva forma de considerar la vida útil de las materias primas. En lugar de desechar aquellas fracciones o materias primas que quedaron en un estado no aprovechado durante su procesamiento, se busca recuperarlos para reintegrarlos en la cadena productiva. Esto da origen a lo que conocemos como "Economía Circular," un concepto que va más allá de la valorización energética o material y se enfoca en disminuir la energía utilizada, lo que a su vez reduce las emisiones y se convierte en un pilar importante para frenar el avance del cambio climático.

En el marco de esta problemática y con el objetivo de avanzar hacia una industria minera más sostenible y responsable, surge el presente trabajo de investigación. El enfoque principal de esta tesis es explorar y evaluar la viabilidad técnica y ambiental de la carbonatación como método para transformar los residuos minerales en materiales de construcción de alta calidad.

El propósito fundamental de este estudio es aprovechar al máximo los residuos minerales y convertirlos en productos útiles que cumplan con los exigentes estándares de la industria de la construcción.

Justificación del proyecto

El proyecto propuesto tiene una justificación que se enfoca en dos aspectos claves dentro de la industria minera: reducir los residuos mineros y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En primer lugar, se busca crear y desarrollar un proceso que contribuya a la disminución

de los residuos mineros mediante el reciclaje de los desechos provenientes de los relaves. Estos relaves son subproductos de la actividad minera que pueden tener un impacto ambiental considerable si no se gestionan adecuadamente. Con este proyecto, pretendemos minimizar su impacto negativo y transformarlos en materiales o productos útiles, lo que reduciría la cantidad de residuos que terminan en vertederos o en áreas inadecuadas de almacenamiento. Además de mejorar la gestión de los residuos mineros, esta iniciativa podría abrir nuevas oportunidades económicas mediante la comercialización de los materiales reciclados.

En segundo lugar, la propuesta adopta un enfoque innovador al utilizar el gas de CO₂ como fuente de energía. Para lograrlo, se capturaría y aprovecharía el CO₂ proveniente de chimeneas industriales de otros procesos en desarrollo en la propia minera. Esta estrategia se presenta como una solución prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Al incorporar el CO₂ como fuente de energía en el proceso de carbonatación, contribuiríamos significativamente a alcanzar cero emisiones de gases de efecto invernadero en nuestra operación. Esto nos permitiría avanzar hacia una industria minera más sostenible y comprometida con la mitigación del cambio climático, al reducir considerablemente nuestra huella ambiental.

Además de los beneficios ambientales, este proyecto tendría un impacto positivo dentro de la industria minera en términos económicos. Al implementar un proceso y un producto novedosos basados en la utilización del gas de CO₂, podríamos ofrecer oportunidades de retribución económica especialmente para la pequeña y mediana minería. La adopción de tecnologías más limpias y sostenibles podría generar incentivos económicos y mejorar la percepción pública de nuestra industria. Esto, a su vez, atraería inversiones en un mercado cada vez más consciente de la importancia de asumir responsabilidades ambientales.

Principales industrias emisoras de co2 a nivel global

La producción de acero, cemento y energía se encuentra en la lista de las industrias más perjudiciales para el medio ambiente a nivel global. En particular, el sector energético es responsable de aproximadamente el 25% de las emisiones totales de carbono en el mundo, mayormente debido a la combustión de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural. Estados Unidos y China son dos países destacados en este

contexto, siendo responsables del 30% y 50% de las emisiones totales del sector eléctrico, respectivamente. La industria del cemento, por su parte se coloca como la segunda emisora del carbono después del sector energético, aportando alrededor del 8% del total de emisiones. Cabe mencionar que China, como principal productor de cemento, contribuye en gran medida a la mitad de las emisiones relacionadas con esta industria a nivel mundial. En promedio, la producción de una tonelada de cemento genera 0,8 toneladas de CO₂. Además, la industria siderúrgica también tiene un papel importante en las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que representa el 25% de las emisiones directas de GEI en los sectores industriales y el 7% del total de emisiones directas.

Método de secuestro mineral de co₂

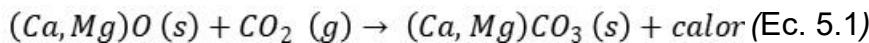
El secuestro mineral es una técnica que busca capturar y almacenar el dióxido de carbono de manera permanente, convirtiéndolo en un compuesto sólido y estable. El método más investigado es la carbonatación mineral, que implica la reacción del CO₂ con un compuesto mineral para producir carbonato. Los carbonatos formados son inertes y pueden ser reutilizados con fines constructivos. El secuestro mineral es actualmente el único método conocido para capturar y almacenar el CO₂ de manera permanente, lo que lo convierte en una opción importante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Carbonatación mineral

La carbonatación mineral fue desarrollada desde 1990 por W. Seifritz, para imitar la erosión natural de las rocas de calcio y magnesio causada por la meteorización. Esta técnica implica fijar permanentemente el CO₂ mediante la reacción de este gas con óxidos de metal, como el óxido de calcio (CaO) o el óxido de magnesio (MgO).

El mecanismo durante el proceso de carbonatación se basa, en una difusión del CO₂ en la superficie de la partícula sólida, donde se da lugar a la reacción debido a encontrarse con iones ya disueltos de algún elemento alcalino, formando como producto un carbonato geológicamente estables y no dañinos para el medio ambiente al transcurrir la reacción. Para el desarrollo de la reacción es importante la presencia de silicatos ricos en metales alcalinotérreos, comúnmente encontrando a los elementos calcio y magnesio, debido a

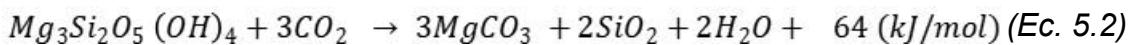
que, favorecen el proceso en el mineral. El proceso se generaliza en la siguiente reacción química:



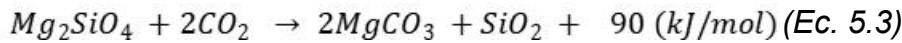
La reacción ocurrida en la carbonatación es catalogada como una reacción exotérmica, es decir, que en su desarrollo libera calor y no necesita la aportación de energía externa, produciéndose debido a una diferencia de energías, dado que existe menor energía en los productos que en los reactivos. Esta diferencia es debido a la separación de los enlaces químicos entre las moléculas que reaccionan de dióxido de carbono (CO₂) e hidróxido (OH) proveniente del carbonato y forman nuevos enlaces entre los átomos de las moléculas resultantes de hidrógeno (H) y oxígeno (O), estos nuevos enlaces liberan energía en forma de calor y de manera similar lo hace la precipitación del sólido carbonato. La reacción química produce carbonato cálcico (CaCO₃) o carbonato de magnesio (MgCO₃), que son inertes y poco solubles, y pueden ser almacenados o reutilizados como material de construcción. Aunque la reacción es termodinámicamente favorable y ocurre en la naturaleza naturalmente, su velocidad de carbonatación es muy lenta y puede tardar cientos o miles de años en completarse.

En la naturaleza, los óxidos de magnesio y de calcio se encuentran en las rocas silicatadas, como la serpentina, el olivino o la wollastonita, y las reacciones producen el carbonato correspondiente (de magnesio o de calcio) y sílice (SiO₂) u otros compuestos como producto final.

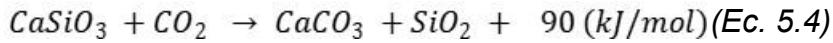
Reacción química de la serpentina:



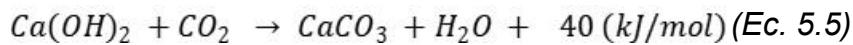
Reacción química del olivino:



Reacción química de la wollastonita:



Reacción química de la portlandita:



Las propiedades de los minerales que permiten el proceso de secuestro de CO₂ se detallan en la Tabla 2.1 la cual contiene una estimación del cociente entre la masa de CO₂ capturado y la masa de mineral utilizada para su captura, reflejando la cantidad de mineral requerido para el secuestro de CO₂ a nivel industrial.

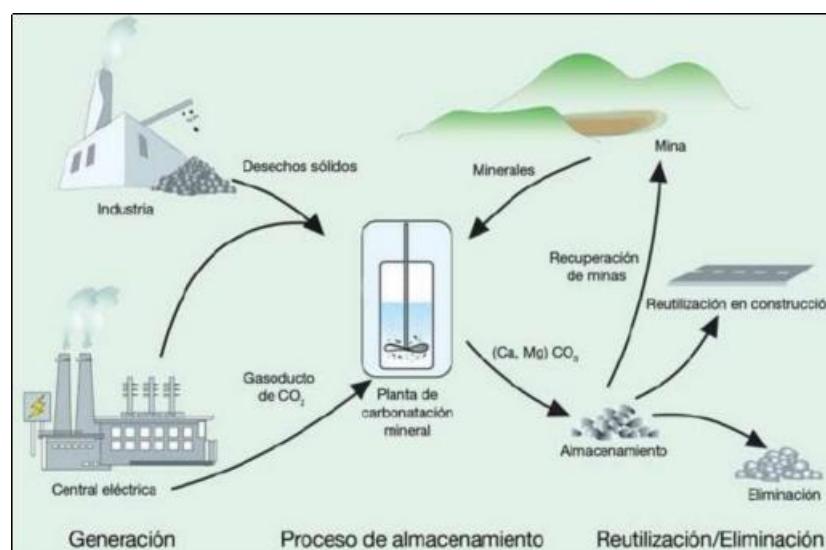
Tabla 5.1: Composición y características en el secuestro de CO₂ de algunos minerales.

Mineral	MgO [% masa]	CaO [% masa]	R [kg CO ₂ / kg mineral]
Olivino	49,5	0,3	0,56
Serpentina	40	0	0,43
Wollastonita	44	35	0,27
Portlandita	0	94,56	0,48

Fuente: Elaboración propia, basado de Palencias San Segundo, 2018.

En síntesis, las etapas del proceso de secuestro mineral de CO₂ mediante la técnica de carbonatación de materiales como minerales o residuos industriales, se representan de forma esquemática en la siguiente imagen:

Figura 5.1: Esquema de las fases del proceso de captura mineral del dióxido de carbono a partir de la carbonatación de rocas silicatadas o residuos industriales



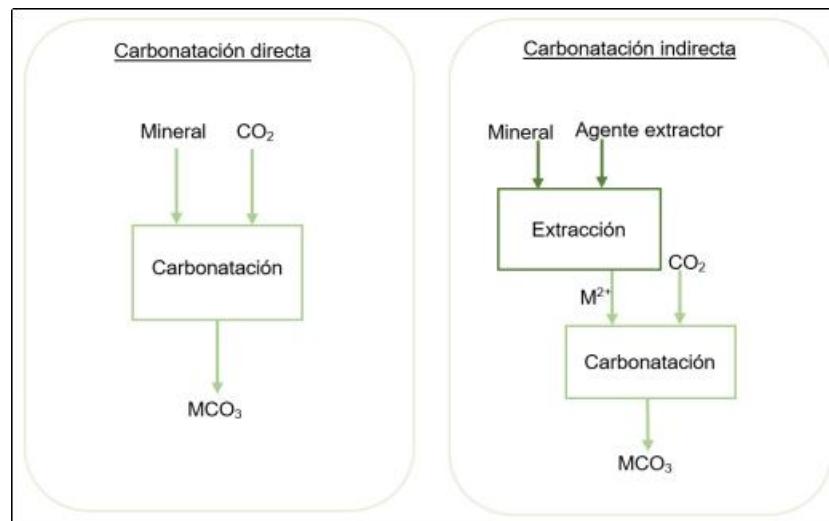
Fuente: (Suñé Grande , 2014)

Formas de efectuar la carbonatación mineral

Existen dos formas de efectuar el proceso de carbonatación mineral: in-situ y ex-situ. En la primera, se inyecta el CO₂ directamente en los minerales bajo tierra, mientras que en la

segunda se integra el proceso de secuestro de CO₂ en la actividad industrial. El método de mayor interés industrial es el ex-situ, el cual se divide en dos vías: carbonatación directa e indirecta. La gran diferencia entre las vías del método es debido a que la carbonatación indirecta, utiliza agentes extractores que disuelven los minerales, facilitando así la carbonatación posterior y aumentando la velocidad de reacción. La figura a continuación compara ambos tipos de carbonatación.

Figura 5.2: Esquema comparando el proceso de carbonatación directa y el proceso de carbonatación indirecta

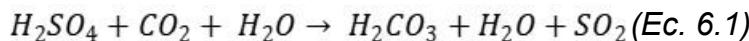


Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Carbonatación Mineral como Método de Revalorización de Residuos Industriales

La carbonatación artificial es utilizada en la industria minera para tratar relaves mineros, formados a partir de varios minerales y compuestos. Este proceso surge por la generación de soluciones acidas, provenientes de sulfuros metálicos como la pirita (FeS₂), la calcopirita (CuFeS₂), la galena (PbS) y la esfalerita (ZnS), los cuales contienen metales como el cobre, el zinc, el plomo, el arsénico y el cadmio.

En términos más generales, son adecuados los relaves que contienen abundantes silicatos de magnesio y minerales de sulfuro que generan poca acidez. Sin embargo, cuando los sulfuros metálicos están expuestos al aire y al agua, pueden oxidarse y formar ácido sulfúrico (H₂SO₄), aumentando con esto la acidez de las aguas. Para tratar estas soluciones acidas, se utiliza la carbonatación de manera artificial. La reacción química ocurrida es la siguiente:



Este proceso implica la adición de dióxido de carbono a la solución, suministrado desde cilindros de gas comprimido a diferentes presiones, consiguiendo aumentar el pH de la solución y reduciendo con esto el posible impacto ambiental. El pH de la solución inicialmente dependerá de las características variadas del relave, como son el tipo de mineral que se está explotando, la presencia de contaminantes en el mineral y el método utilizado en la planta de procesamiento, junto a las características anteriores la cantidad de CO₂ suministrada. Las variaciones del pH pueden ir desde valores menores a 2 logrando aumentar y mantenerse cercano a 7, consiguiendo la neutralidad y un menor impacto para al medio ambiente.

El objetivo principal de agregar CO₂ a la reacción, es neutralizar el ácido sulfúrico y formar acido carbónico (H₂CO₃), asimismo el añadir este gas ayuda a precipitar los metales y otros contaminantes. Otro reactante que contribuye a la precipitación de metales es la cal o el carbonato de calcio, el cual reacciona con el CO₂ y aumenta la eficiencia.

Como se menciona, en algunos casos la carbonatación se puede realizar en torres de absorción, que consisten en una columna llena de piedras calizas u otro material de carbonato que se empapan con la solución ácida y el CO₂. A medida que la solución fluye hacia abajo a través de la columna, se produce la reacción química que neutraliza la acidez.

Factores que afectan la eficacia de la carbonatación en la valorización de residuos mineros

La eficacia de la carbonatación mineral está influenciada por diversos factores clave que deben ser considerados en el proceso. Es crucial comprender estos factores para garantizar el éxito de la carbonatación mineral y maximizar la producción de materiales de construcción sostenibles. A continuación, se detallan los factores más relevantes:

- ✓ Composición del Residuo Mineral;
- ✓ Granulometría de los Residuos;
- ✓ Relación Sólido-líquido;
- ✓ Concentración de Dióxido de carbono;
- ✓ pH;
- ✓ Presión y Temperatura;

- ✓ Tiempo de Reacción;
- ✓ Catalizadores y Aditivos;
- ✓ Profundidad de Minerales.

Relaves residuos de la industria minera con potencial de carbonatación

Los relaves mineros, provenientes de la planta de procesamiento de minerales, consisten en residuos generados como resultado de los procesos mecánicos y químicos empleados para tratar la roca extraída del yacimiento. Estos procesos tienen como objetivo la extracción del mineral contenido en la roca, con la finalidad de obtener beneficios económicos. En la actualidad, en nuestro país se lleva a cabo una extracción abundante de minerales como cobre, molibdeno, oro, plata, hierro, plomo, zinc y manganeso.

Depósito de relaves

Un depósito de relaves es una infraestructura diseñada específicamente para contener y aislar de manera segura los materiales residuales generados por actividades industriales. Su construcción y funcionamiento se rigen por estrictas normativas ambientales con el objetivo de prevenir la contaminación y proteger el entorno natural de los efectos negativos de estos residuos potencialmente perjudiciales. Estas estructuras son fundamentales para garantizar el manejo adecuado de los desechos industriales, minimizando los impactos ambientales y salvaguardando la calidad de los recursos hídricos y los ecosistemas circundantes.

Cinética de carbonatación de morteros de cal

El estudio de los parámetros de la reacción de carbonatación de morteros de cal constituye una técnica útil para comprender las antiguas técnicas empleadas y la estabilidad fisicoquímica de importantes monumentos romanos.

En morteros de cal fraguados al aire y siguiendo las técnicas romanas, el árido es el relleno que estabiliza el volumen total de la mezcla, reduciendo su retracción y las fisuras durante el secado. La matriz de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) se endurece al contacto con el aire por su mezcla con el CO_2 atmosférico y su transformación en calcita (CaCO_3). El agua de

amasado y el tipo y proporción de áridos son también importantes para establecer un sistema de poros que permita la necesaria difusión y asimilación del CO₂, sin embargo, un sistema excesivamente abierto y con poros demasiado conectados puede ser perjudicial para el mortero debido a la interacción de la lluvia, aguas subterráneas o el crecimiento de sales. El estudio de los parámetros que intervienen en la cinética de la reacción que da lugar a los morteros de cal constituye una técnica muy útil para comprender las técnicas de construcción de los antiguos monumentos y la resistencia fisicoquímica de los materiales realizados por los romanos. Obviamente, el conocimiento de la cinética del fraguado tiene una gran influencia en la cinética de la reacción y condicionan las características texturales y mecánicas del mortero resultante. Las responsables de la extraordinaria fuerza, resistencia y dureza de estos morteros tradicionales son las reacciones puzolánicas.

Reacciones Puzolánicas

Las reacciones puzolánicas son procesos químicos que ocurren cuando un material puzolánico, se mezcla con cal hidratada y agua. Durante esta reacción, se forma una pasta que se endurece y se convierte en un material sólido y resistente.

La reacción puzolánica es importante en la producción de cemento y hormigón, esta colabora a mejorar la resistencia y durabilidad del material. En la elaboración de morteros y hormigones, se busca utilizar puzolanas cuya composición química contenga un porcentaje mayor al 70% de sílice (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y óxido férrico (Fe₂O₃) en su composición química.

La actividad puzolánica se mide a través de varias pruebas químicas y mecánicas para determinar la reactividad del material con la cal hidratada y la velocidad a la que se une al Ca (OH)₂ en presencia de agua.

Material y equipos

Equipo Carbonatador

Funcionamiento Carbonatador

Para la realización de la tesis, el equipo primordial es un carbonatador, el cual por su funcionamiento permite la integración del CO₂ gaseoso, en la masa de residuos a tratar

por esta tecnología. Este equipo simula, en parte, la alteración epitermal, que es un proceso natural que involucra la liberación de gases volátiles en la corteza terrestre. Al igual que en la alteración epitermal, el carbonatador facilita la liberación controlada de dióxido de carbono (CO_2) en un entorno controlado.

El carbonatador, mediante la generación de un flujo constante de CO_2 gaseoso, introduce dicho gas en la masa de residuos a través de diferentes mecanismos. Utilizando una combinación de presión y temperatura, el carbonatador promueve la solubilidad de CO_2 en los residuos, permitiendo que se disuelvan de manera eficiente. Además, se pueden ajustar parámetros como la temperatura, la humedad adecuada y el tiempo de exposición para optimizar la cantidad de CO_2 absorbido.

Una vez que el CO_2 se ha integrado en la masa de residuos, se produce una reacción química que ayuda a estabilizar los contaminantes presentes en dicha masa. Esta reacción contribuye a la reducción de acidez de los residuos y promueve la formación de compuestos menos tóxicos o volátiles. De esta manera, el carbonatador no solo permite la integración del CO_2 , sino que también contribuye a mejorar la calidad y estabilidad de los residuos tratados.

Diseño Carbonatador

Primero, se diseñó y construyó un equipo carbonatador, el que realiza ensayos de carbonatación acelerada, simulando ser una cámara con una alta concentración de CO_2 y condiciones de temperatura y humedad controladas. Las dimensiones del equipo fueron calculadas, comenzando este cálculo por la sección donde circulara el gas.

Las dimensiones estructurales de 1,05 m de largo, 0,35 m de ancho y 0,7 m de alto. En su interior, se agregó una división a una altura de 0,35 m. En esta sección, se instaló una rejilla plana de 0,28 m por 0,42 m, destinada a la disposición de los ladrillos y la recirculación. Además, se añadió una tapa con bisagra de 0,28 m por 0,2 m, la cual permite regular la recirculación del gas. Dicha tapa se puede ajustar en un rango de 0° a 90°. Por último, se instaló una tapa con bisagra y manilla de 0,5 m por 0,35 m en la superficie del equipo, con el propósito de facilitar la inserción y extracción de los ladrillos. Todos estos detalles se pueden apreciar en la Figura 7.1.

Figura 7.1: Estructura interna del equipo con la instalación de sus aparatos.



Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Recolección y Antecedentes de los Relaves Mineros

El material utilizado se obtiene de una planta situada en la vega, comuna de Cabildo, provincia de Petorca perteneciente a la Región de Valparaíso, Chile. Las coordenadas UTM son 323260,79 mE y 6433273,01 mS. Esta planta se dedica a la producción de cobre y plata a través del proceso de flotación del mineral de cobre, obteniendo la plata como subproducto. En el primer relave, se recolecta material de 4 sectores diferentes: uno estratificado, uno proveniente de la mina Dulcinea, uno proveniente de la mina Lucifer y un último que combina material de las minas Dulcinea y Lucifer, cabe destacar que la planta procesa material proveniente de minas cercanas.

Figura 7.2: Primer relave (R1)



Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Asimismo, se obtiene material de un relave abandonado ubicado en las cercanías del

punto anterior. Este relave se encuentra en la localidad de los Molles, comuna de la Ligua, provincia de Petorca, perteneciente a la Región de Valparaíso. Las coordenadas UTM correspondientes son 263055,52 mE y 6430232,24 mS. En este lugar, se lleva a cabo la extracción de material de cinco sectores diferentes: sector superficial, sector subsuperficial, sector inferior, sector intermedio y sector profundo.

Figura 3.5: Segundo relave (R2).



Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Proceso de Carbonatación

Se llevo a cabo el proceso de carbonatación acelerada de manera rigurosa y precisa. Tras la introducción del lote de ladrillos o probetas, se inició dicho proceso, el cual se extendió a lo largo de un periodo de 2 horas.

Durante este intervalo de tiempo, se aplicaron cuidadosamente diversas medidas para garantizar condiciones óptimas. Se logró mantener una temperatura interna constante de aproximadamente 50°C dentro del equipo, aprovechando al máximo el rendimiento del ventilador y vaporizador. Esta configuración permitió alcanzar una humedad relativa inicial del 95%, la cual se redujo a un rango entre el 70% y 80% durante el proceso, procurando mantener una temperatura constante y reducir la humedad resulto ser un factor clave en el proceso de carbonatación, observando que, la humedad relativa optima se encuentra

en el rango de 40% a 80%.

Adicionalmente, se realizó la inyección controlada de dióxido de carbono (CO_2) mediante el uso del regulador de presión, que fue ajustado a 1 bar. Esta configuración permitió mantener una concentración constante de 10.000 ppm (partes por millón) de CO_2 a lo largo de todo el proceso. Con el fin de cautelar el buen desarrollo del proyecto, se utilizó la alarma previamente regulada en el medidor de CO_2 para asegurar que el nivel deseado de concentración se mantuviera, alertando en caso de que disminuyera.

Figura 7.4: Regulador de presión específico para gas CO_2 .



Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Al concluir las 2 horas del proceso, se procedió a realizar una nueva medición del peso de cada uno de los ladrillos. Para dar continuidad al proceso de carbonatación, las muestras se dejaron secar a temperatura ambiente durante un periodo adicional de 8 días, hasta que alcanzaron la humedad relativa del ambiente. Durante este periodo posterior al ingreso del equipo, las muestras fueron pesadas y registradas diariamente, lo cual permitió un seguimiento preciso de la evolución de su secado.

Figura 7.5: Pesaje de muestras inmediatamente posterior al proceso de carbonatación.



Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Resultados

Las muestras preparadas tienen un porcentaje para el caso de la mezcla 1, con un 15,94%. La mezcla 2 tiene un promedio de calcio del 11,43%, la mezcla 3 del 11,68% y, finalmente la mezcla 4 presenta un promedio de calcio del 10,78%, para estas se obtienen los siguientes resultados para las probetas luego de su carbonatación.

Para la mezcla 1, se obtuvo un promedio de calcio del 18,59%. Para las probetas de la mezcla 2, se registró un promedio de calcio del 20,29%. En el caso de las probetas de la mezcla 3, se obtuvo un valor promedio de calcio del 17,50%. Por último, para las probetas de la mezcla 4, se registró un valor promedio de calcio del 14,59%.

Seguidamente, se presentan los resultados del estudio de análisis destructivo realizado para evaluar las propiedades mecánicas de las probetas. En la tabla siguiente, se muestra el análisis que comprende los ensayos de resistencia a la compresión en dos orientaciones para cada una de las probetas fabricadas con distintas mezclas.

Muestras	Numeración	kN	mm ²	cm ²	kN/cm ²	MPa
R1M1	I	10,9	6071,65	60,72	0,18	1,80
	II	5,7	2621,44	26,21	0,22	2,17
	III	8,4	2502,50	25,03	0,34	3,36
	IV	8	2413,27	24,13	0,33	3,32
R2M1	I	4,3	2218,41	22,18	0,19	1,94
	II	3,9	2460,16	24,60	0,16	1,59
	IV	4,1	2383,88	23,84	0,17	1,72
	V	4,9	6321,61	63,22	0,08	0,78
R1M2	I	9,3	6332,31	63,32	0,15	1,47
	II	5,4	2304,00	23,04	0,23	2,34
	IV	4,1	2253,88	22,54	0,18	1,82
	V	3,7	2415,72	24,16	0,15	1,53
R2M2	I	7,3	2311,21	23,11	0,32	3,16
	III	10	2386,32	23,86	0,42	4,19
	IV	5,5	2403,45	24,03	0,23	2,29

	V	17,7	6610,63	66,11	0,27	2,68
R1M3	I	4,9	2410,81	24,11	0,20	2,03
	II	7,7	6531,02	65,31	0,12	1,18
	III	5,4	2318,42	23,18	0,23	2,33
	V	3,6	2403,45	24,03	0,15	1,50
	I	2,7	2268,14	22,68	0,12	1,19
R2M3	III	3,2	2393,66	23,94	0,13	1,34
	IV	6,9	6590,34	65,90	0,10	1,05
	V	3,1	2371,69	23,72	0,13	1,31
	I	3,3	2220,77	22,21	0,15	1,49
R1M4	II	3,6	2477,55	24,78	0,15	1,45
	III	4,4	2361,96	23,62	0,19	1,86
	IV	9,9	7105,73	71,06	0,14	1,39
	I	16,4	6449,96	64,50	0,25	2,54
R2M2 (Sin CO ₂)	II	5,4	2272,91	22,73	0,24	2,38
	IV	4,4	2316,02	23,16	0,19	1,90
	VI	4,7	2388,77	23,89	0,20	1,97

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Bibliografía

Aguero García, Romina. 2012. *Proceso de Captura y Almacenamiento de dioxido de carbono*. Ingeniería Química : Universidad de la sapienza Roma, 2012.

Castañeda Estremadyro, Álvaro Alejandro. 2021. *Estudio del avance de la reacción de geopolimerización del residuo de catalizador de craqueo catalítico de petróleo*.

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ. Lima : s.n., 2021. pág. 72, TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN QUÍMICA.

Fuentes Valencia, Cristian . 2022. Prensa UChile. [En línea] 21 de septiembre de 2022.
<https://uchile.cl/noticias/190209/sector-residencial-produce-mas-del-90-de-emisiones-contaminantes-mp-#:~:text=Por%20otro%20lado%C2%20los%20sectores,el%20que%20m%C3%A1s%20genera%20SO2..>

La Tercera, Center for climate and resilience. 2022. Realizan el primer y más detallado mapa de la contaminación en Chile: sector residencial es responsable de más del 90% de las emisiones (La Tercera). [En línea] 22 de septiembre de 2022.

<https://www.cr2.cl/realizan-el-primer-y-mas-detallado-mapa-de-la-contaminacion-en-chile-sector-residencial-es-responsable-de-mas-del-90-de-las-emisiones-la-tercera/>.

Ministerio de Salud, Gobierno de Chile. 2004. *Depósitos de relaves por tipo y región de emplazamiento Decreto Supremo N°148*. s.l. : Diario Oficial, 2004.

NCh 167.Of2021, Norma Chilena Oficial. 2001. *Construcción - Ladrillos cerámicos - Ensayos*. Santiago : s.n., 2001.

NCh 168.Of2001, Norma Chilena Oficial. 2001. *Construcción - Ladrillos cerámicos - Verificación dimensional y geométrica*. Santiago : s.n., 2001.

NCh 169.Of2001, Norma Chilena Oficial. 2001. *Construcción - Ladrillos cerámicos - Clasificación y requisitos*. Santiago : s.n., 2001.

NCh 1928.Of1993, Norma Chilena Oficial. 2009. *Albañilería armada - Requisitos para el diseño y cálculo*. Santiago : s.n., 2009.

NCh 2123.Of1997, Norma Chilena Oficial. 2003. *Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo*. Santiago : s.n., 2003.

NCh181.Of2006, Norma Chilena Oficial. 2006. *Bloques de hormigón para uso estructural - Requisitos generales*. Santiago : s.n., 2006.

Palencias San Segundo, Livia. Junio, 2018. *Trabajo Fin de Grado Revalorización de residuos industriales mediante secuestro mineral de CO₂ - El caso particular del fosfoyeso-*. Departamento de Física de la Materia Condensada Doble Grado en Física e Ingeniería de Materiales, Universidad de Sevilla. Junio, 2018. pág. 50, Tesis

Petrucci, Ralph H. , y otros. 2011. QUIMICA GENERAL Principios y aplicaciones modernas. Madrid : Pearson, 2011.

SEIFRITZ, W. 1990. Eliminación de CO₂ mediante silicatos. *nature*. [En línea] 7 de junio de 1990. <https://www.nature.com/articles/345486b0#article-info>.

Sernageomin, Servicio Nacional de Geología y Minería. 2022. Depósitos de relaves por tipo y región de emplazamiento. [En línea] 2022. <https://www.sernageomin.cl/>.

Stokreef, Stephen, y otros. 2022. Science Direct. *Carbonatación mineral de relaves ultramáficos: una revisión de los mecanismos de reacción y cinética, estudios de casos de la industria y modelos*. [En línea] junio de 2022.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822000969#sec2>.

Suñé Grande , Francisco Jose. 2014. Captura y almacenamiento de CO₂ (II). *ingenieriaquimica.net*. [En línea] 23 de Enero de 2014.

<https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/340-captura-y-almacenamiento-de-co2-ii>.

Universidad de Granada. Química de las aguas naturales. [aut. libro] Universidad de Granada. [ed.] Universidad Nacional Autónoma de México. *Química de las aguas naturales*. s.l. : rua mx Red Universitaria de Aprendizaje, Tema 6: Procesos ácido-base en aguas naturales: el sistema CO₂/Carbonato, pág. 50.

USACH, Simet. Laboratorio de ensayos. *Difraccion de rayos X*. [En línea] <https://m.simet.cl/rayos/>.

Valderrama, José, Campusano, Richard Campusano y Espindola, Cesar. 2019.

Chilean Mining: Capture, Transport, and Storage of Carbon Dioxide in Tailings using Ionic Liquids and Carbonation. [En línea] Inf. tecnol. vol.30 no.5, octubre de 2019.

<https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v30n5/0718-0764-infotec-30-05-357.pdf>.