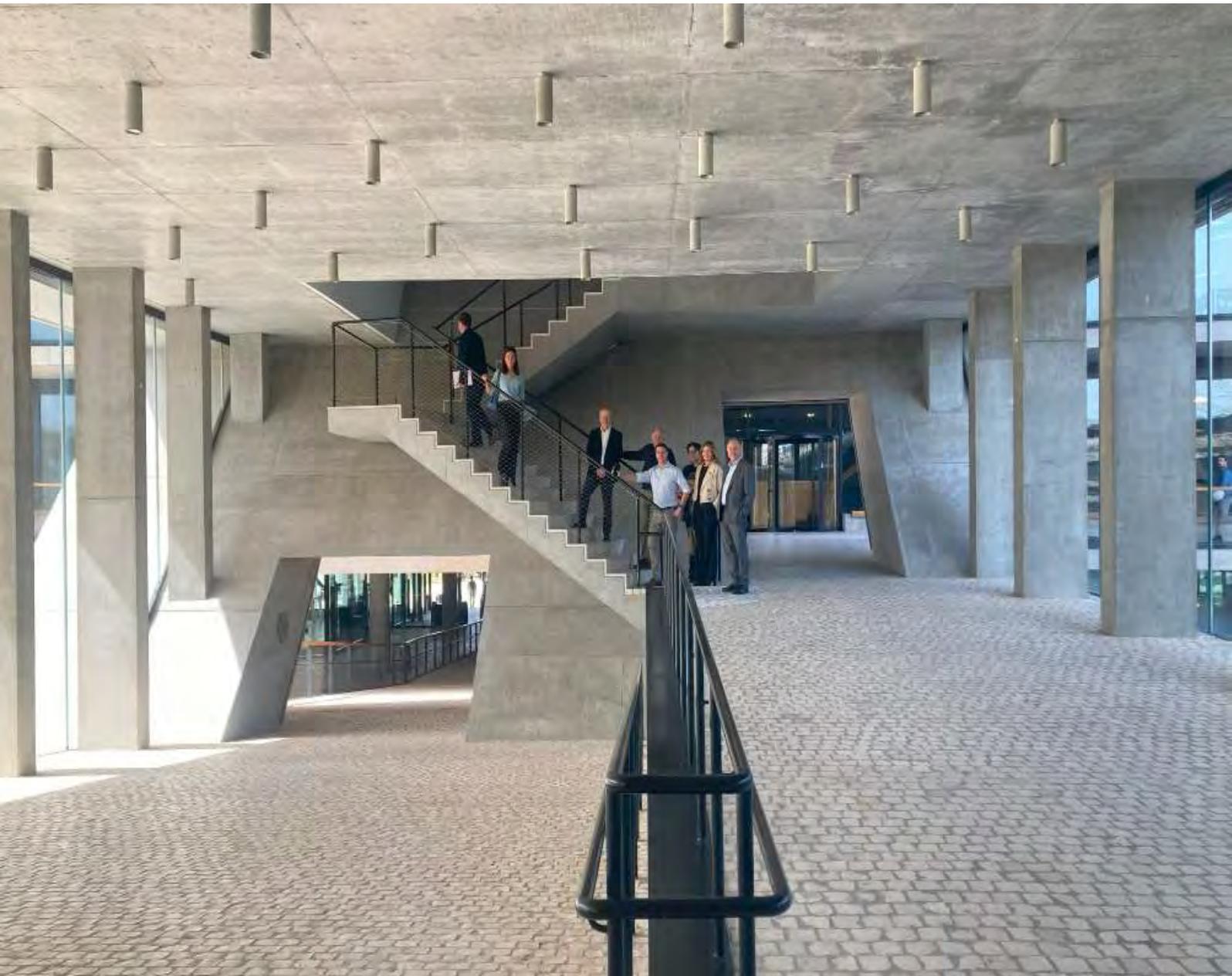


MATERIALES y EDIFICACIÓN

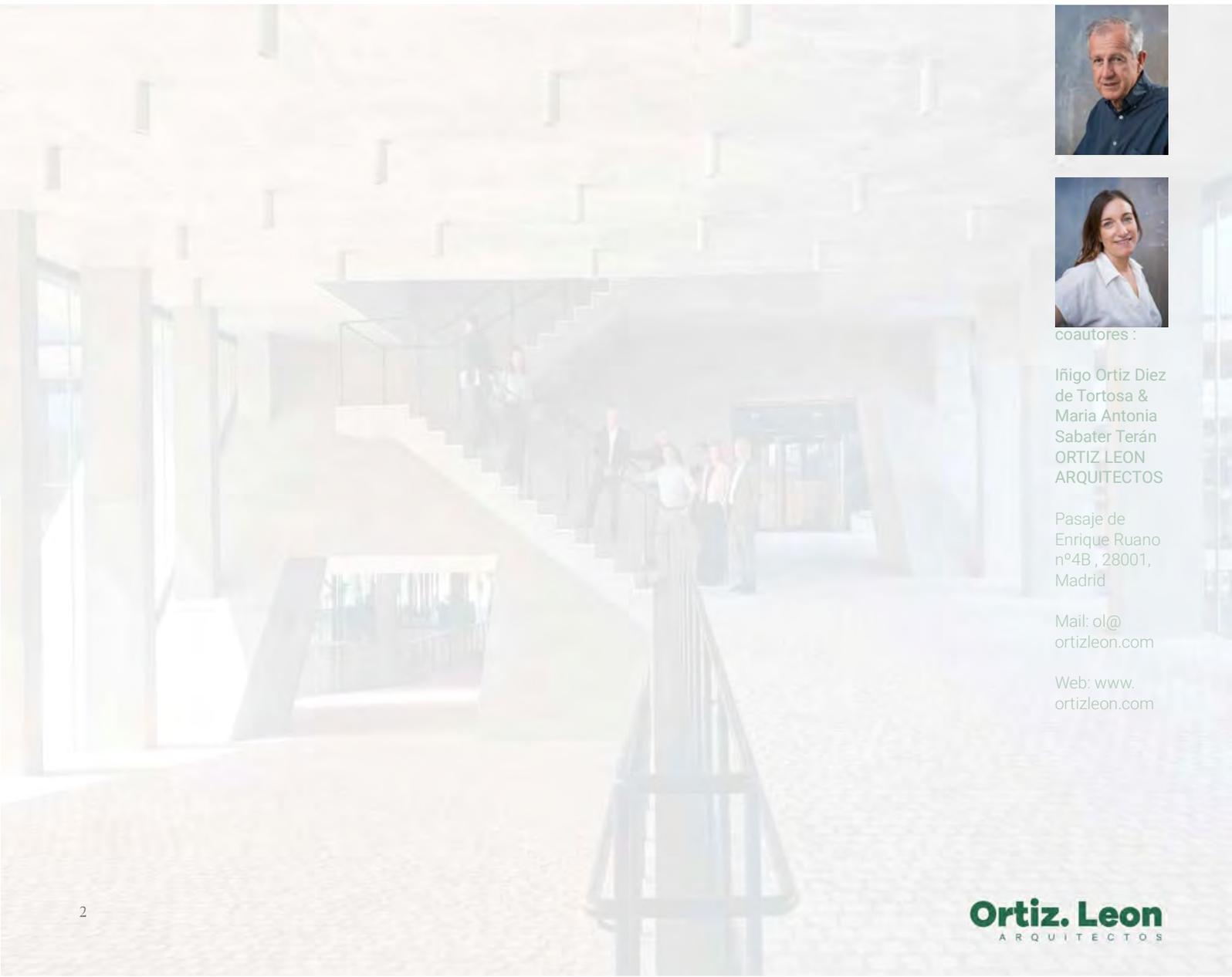
# El futuro del hormigón

REPURPOSING CONCRETE

**Ortiz. Leon**  
ARQUITECTOS



# El futuro del hormigón



coautores :

Iñigo Ortiz Diez  
de Tortosa &  
Maria Antonia  
Sabater Terán  
ORTIZ LEON  
ARQUITECTOS

Pasaje de  
Enrique Ruano  
nº4B , 28001,  
Madrid

Mail: [ol@  
ortizleon.com](mailto:ol@ortizleon.com)

Web: [www.  
ortizleon.com](http://www.ortizleon.com)



Edificio Arqborea\_Ortiz León Arquitectos

## RESUMEN EJECUTIVO:

### 0. Introducción

El hormigón ha sido un material fundamental en la construcción de infraestructuras esenciales a lo largo de la historia, desde los coliseos romanos hasta los modernos rascacielos que definen nuestras ciudades. Su durabilidad, versatilidad y coste relativamente bajo lo han convertido en la columna vertebral del desarrollo humano. Sin embargo, su impacto ambiental, especialmente en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> ha generado un punto de inflexión en la industria.

Actualmente, el sector de la construcción enfrenta un doble desafío: responder a las demandas de urbanización acelerada y, al mismo tiempo,

alinearse con objetivos globales de sostenibilidad. Este informe analiza cómo innovaciones en tecnología, materiales y procesos están transformando al hormigón en un material compatible con un futuro de bajas emisiones. Desde la reducción del clinker hasta la introducción de tecnologías avanzadas como la captura y almacenamiento de carbono (CCS) o la utilización de energías renovables, la industria está avanzando hacia soluciones que permiten reducir su huella de carbono.

En última instancia, **la visión de un hormigón con impacto ambiental drásticamente reducido no solo es una necesidad, sino una oportunidad para liderar un cambio en los paradigmas constructivos.** A medida que estas tecnologías innovadoras maduran, el hormigón tiene el potencial de evolucionar, manteniéndose relevante como el pilar de la construcción moderna, pero también como un aliado en la lucha contra el cambio climático.

### NUEVAS TECNOLOGÍAS EN DESARROLLO:

#### 1. Reducción del clinker

El clinker, responsable del 90% de las emisiones del cemento, puede ser parcialmente reemplazado por materiales como el LC3 (Cemento de Arcilla Calcinada de Piedra Caliza), lo que podría reducir las emisiones más allá del 40% .



Investigación de texturas en el hormigón.



Textura del hormigón visto: un equilibrio entre estética y funcionalidad en arquitectura

## El hormigón se reinventa: de pilar de la construcción a aliado del planeta.

### 2. Sustitución de Áridos

La empresa Brimstone está desarrollando agregados alternativos que podrían hacer que el hormigón sea carbono negativo, eliminando la necesidad de áridos tradicionales.

### 3. Energía Renovable en la Producción

Synhelion está trabajando en la utilización de energía solar para el proceso de fabricación del cemento, reduciendo así la huella de carbono del proceso.



Hormigón Transparente: La Revolución que ilumina la Arquitectura del futuro .

### 4. Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS)

La planta en Brevik, Noruega, es pionera en la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> durante la producción de cemento, un paso crucial hacia el hormigón libre de carbono.

### 5. Introducción de CO<sub>2</sub> en el Proceso de Fabricación o en el vertido

La tecnología de CarbonCure introduce CO<sub>2</sub> capturado durante la mezcla del hormigón, donde se mineraliza y queda encapsulado, mejorando las propiedades del material y reduciendo su huella de carbono.

### 6. Mejorar el concepto de “cascading”

al utilizar y diseñar piezas prefabricadas de hormigón pensando en su futuro segundo uso

### 7. Conclusión

El hormigón, pilar de la infraestructura global, está experimentando una transformación esencial hacia la sostenibilidad.

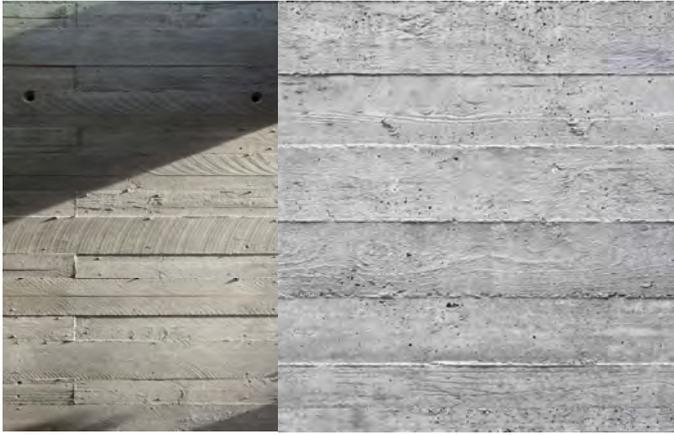
A lo largo de este análisis, se han destacado tecnologías clave como la reducción del clinker, la utilización de áridos reciclados y artificiales, el empleo de energías renovables y la integración de soluciones como la captura y almacenamiento de carbono.

Estas innovaciones no solo reducen las emisiones, sino que también mejoran la eficiencia y durabilidad del material, sentando las bases para un modelo de construcción más sostenible.

El futuro del hormigón está en la implementación de estas tecnologías a gran escala, enfrentando retos técnicos y regulatorios con una colaboración activa entre la industria, los gobiernos y la academia. Este esfuerzo conjunto no solo permitirá mitigar el impacto ambiental del hormigón, sino que lo posicionará como un material clave en un futuro construido sobre principios de sostenibilidad y economía circular.

**¿Estamos listos para liderar esta revolución en los materiales de construcción y redefinir el papel del hormigón en el mundo del mañana?**

**El hormigón ha sido la columna vertebral de la infraestructura humana durante siglos.**



Investigación de texturas en el hormigón. Hornigones entablillados vistos

## 0. Introducción:

El hormigón ha sido un pilar fundamental de la civilización humana durante milenios. Desde los antiguos romanos hasta las modernas megaciudades, este material ha permitido la construcción de infraestructuras robustas y duraderas, adaptándose a un sinnúmero de aplicaciones. Su papel central en la urbanización y desarrollo económico global no puede subestimarse.

### 0.1 Historia del Hormigón

El hormigón se remonta a la antigua Roma, donde se utilizaba una mezcla de cal, cenizas volcánicas y puzolana para crear estructuras que aún perduran. La invención del cemento Portland en el siglo XIX revolucionó su producción, permitiendo la creación de hormigón más resistente y

versátil. Esta evolución tecnológica ha impulsado la expansión de las ciudades modernas, permitiendo la construcción de rascacielos, puentes y otras obras de ingeniería de gran escala.

### 0.2 Relevancia en la Infraestructura Moderna

Hoy en día, el hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo, con un consumo global que supera los 10 mil millones de toneladas anuales. Su uso en la construcción de edificios, carreteras, presas y otras infraestructuras es indispensable debido a su resistencia, durabilidad y costo relativamente bajo. La capacidad del hormigón para ser moldeado en formas diversas y su resistencia a condiciones

extremas lo convierten en un material clave en cualquier proyecto de construcción.

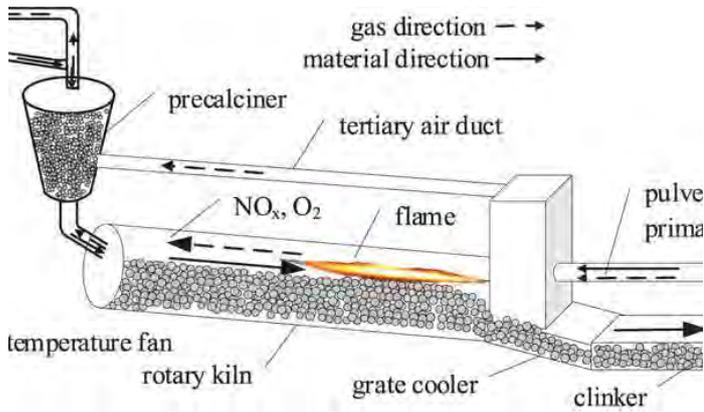
### 0.3 Impacto Ambiental

A pesar de sus numerosas ventajas, la producción de hormigón tiene un costo ambiental significativo. La fabricación de cemento, componente esencial del hormigón, es responsable del 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Esto se debe principalmente a la calcinación de la piedra caliza para producir clinker, un proceso que libera grandes cantidades de dióxido de carbono. Con la urbanización en constante aumento, especialmente en regiones en desarrollo, la necesidad de un hormigón más sostenible se vuelve crucial para mitigar el cambio climático.



Hormigón translúcido: fusión entre diseño arquitectónico y luz natural para espacios innovadores y sostenibles.

**El clinker es responsable del 90% de las emisiones de carbono del cemento.**



Proceso de fabricación de clinker en un horno rotatorio, mostrando las etapas clave.

## NUEVAS TECNOLOGIAS EN DESARROLLO

### 1.Reducción del clinker

El clinker es el componente clave del cemento, y su producción es una de las fuentes más intensivas en carbono dentro de la industria del hormigón. Comprender su papel y las formas de reducir su uso es fundamental para disminuir la huella de carbono del hormigón.

**Reducir el contenido de clinker en el cemento es fundamental para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria.**



Áridos reciclados: optimización de recursos para una construcción más sostenible y eficiente.

### 1.1 ¿Qué es el Clinker?

El clinker es un material nodular que se forma cuando la piedra caliza (carbonato de calcio) se calienta a altas temperaturas en un horno rotatorio. Durante este proceso, la piedra caliza se descompone en óxido de calcio y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este CO<sub>2</sub> liberado representa aproximadamente el 60% de las emisiones de la producción de cemento. El clinker es entonces mezclado con otros materiales para producir cemento.

### 1.2 Impacto Ambiental del Clinker

La producción de clinker es extremadamente intensiva en energía y carbono. La calcinación de la piedra caliza requiere temperaturas superiores a los 1,450 °C, lo que generalmente se logra mediante la quema de combustibles fósiles como el carbón. Este proceso no solo libera CO<sub>2</sub> de la piedra caliza, sino que también genera emisiones significativas de la combustión del combustible.

### 1.3 Estrategias para Reducir el Uso de Clinker

Reducir el contenido de clinker en el cemento es una estrategia clave para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Aquí se presentan algunas de las innovaciones más prometedoras:

#### 1.3.1 Cemento LC3 (Limestone Calcined Clay Cement)

El cemento LC3 sustituye hasta el 50% del clinker por una mezcla de arcilla calcinada y piedra caliza molida. Este proceso no solo reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> porque requiere menos clinker, sino que también utiliza arcilla, que es más

## **El cemento LC3 reduce las emisiones en un 40% al sustituir parte del clinker por arcilla calcinada.**

abundante y fácil de procesar que la piedra caliza. La producción de LC3 puede disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 40% en comparación con el cemento Portland tradicional.

### **1.3.2 Uso de Materiales Cementosos Suplementarios (SCMs)**

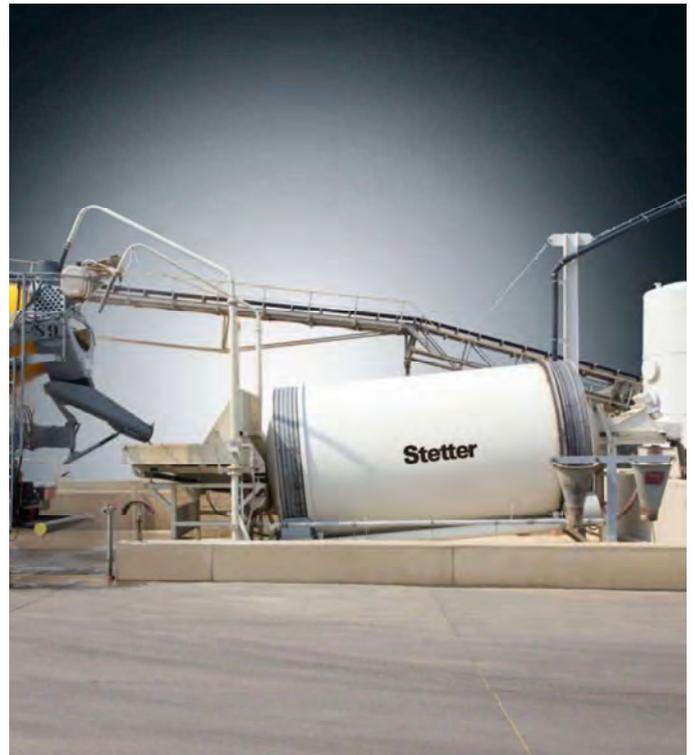
Los SCMs, como las cenizas volantes, la escoria de alto horno y las puzolanas naturales, se pueden mezclar con el cemento para reducir el contenido de clinker sin comprometer la resistencia del hormigón. Estos materiales son subproductos industriales que, al ser reutilizados, contribuyen a una economía circular.

### **1.3.3 Tecnologías de Producción Avanzadas**

Las tecnologías que permiten una producción más eficiente de clinker, como hornos de precalentamiento y sistemas de recuperación de calor, también pueden reducir las emisiones. Además, la investigación en combustibles alternativos, como el hidrógeno o la energía solar concentrada, está en marcha para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles en la producción de clinker.

### **1.4 Casos de Estudio**

- Holcim en Francia ha implementado el uso de LC3, reduciendo significativamente sus emisiones de CO<sub>2</sub> y proporcionando una alternativa más sostenible al cemento tradicional.
- En Colombia, Argos Cementos produce millones de toneladas de cemento LC3 al año, utilizando localmente en carreteras y edificios, demostrando su viabilidad económica y técnica.



Planta de producción de hormigón: un paso crucial hacia materiales más sostenibles y de bajo impacto ambiental.

**El cemento LC3 y los materiales cementosos suplementarios (SCMs) representan un avance clave en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de hormigón, promoviendo la sostenibilidad y la economía circular en la industria de la construcción**



Clinker zero emisiones

**Los áridos reciclados convierten residuos de demolición en recursos valiosos para nuevas construcciones.**

## 2. Sustitución de Áridos

Los áridos, que constituyen la mayor parte del volumen del hormigón, tradicionalmente se extraen de fuentes naturales como la grava y la arena. Aunque esenciales para la estructura del hormigón, la extracción de áridos naturales tiene un impacto ambiental significativo, incluyendo la degradación del paisaje, la pérdida de biodiversidad y el consumo de energía. Por ello, la búsqueda de áridos alternativos es crucial para un hormigón más sostenible.

### 2.1 ¿Qué Son los Áridos?

Los áridos son materiales granulares inertes que, junto con el cemento y el agua, forman la mezcla del hormigón. Se clasifican en áridos finos (arena) y áridos gruesos (grava o piedra triturada). Su función es proporcionar resistencia y estabilidad al hormigón, además de reducir la cantidad de cemento necesaria.

### 2.2 Impacto Ambiental de los Áridos Naturales

La extracción de áridos naturales conlleva una serie de impactos ambientales negativos:

- Degradación del paisaje: Las canteras y minas alteran significativamente el terreno.
- Consumo de energía: La extracción, transporte y procesamiento de áridos requieren una cantidad considerable de energía.
- Pérdida de biodiversidad: Las operaciones de extracción pueden destruir hábitats naturales.
- Contaminación del agua y suelo: La actividad minera puede afectar negativamente a los ecosistemas acuáticos y terrestres.



Producción de áridos artificiales a partir de subproductos industriales.

### 2.3 Alternativas a los Áridos Naturales

#### 2.3.1 Áridos Reciclados

Los áridos reciclados provienen de la trituración de residuos de construcción y demolición. Su uso no solo reduce la demanda de áridos vírgenes, sino que también disminuye la cantidad de residuos enviados a vertederos. Los áridos reciclados son especialmente útiles en aplicaciones no estructurales, como bases de carreteras y rellenos.

Caso Práctico: En Europa, varios proyectos de construcción han demostrado la viabilidad del uso de áridos reciclados. Por ejemplo, el proyecto RE4, financiado por la UE, ha desarrollado métodos para fabricar hormigón con áridos reciclados, logrando propiedades mecánicas comparables a las del hormigón convencional.



Reemplazo sostenible de áridos en el hormigón: Una comparación visual entre la extracción tradicional de áridos en canteras y la innovación en procesamiento de áridos reciclados, mostrando instalaciones de reciclaje, escombros triturados y bloques de hormigón ecológicos.

### 2.3.2 Áridos Artificiales

Estos áridos se producen a partir de subproductos industriales o residuos, como la escoria de alto horno, cenizas volantes o incluso residuos plásticos. Los áridos artificiales pueden tener propiedades físicas y mecánicas superiores, y su uso contribuye a la economía circular.

Innovación: Brimstone, una empresa pionera, ha desarrollado áridos a partir de silicatos de calcio que no solo reemplazan a los naturales, sino que también capturan carbono, haciendo que el hormigón sea carbono negativo.

### 2.3.3 Áridos de Plásticos Reciclados

Incorporar plásticos reciclados en la mezcla de hormigón es otra área de investigación prometedora. Aunque todavía en etapas iniciales, este enfoque podría reducir tanto los residuos plásticos como la extracción de áridos.

Proyecto Piloto: En Australia, un grupo de investigación ha creado bloques de hormigón con plásticos reciclados, logrando una reducción del 20% en el uso de áridos naturales y mejorando la flexibilidad del material.

Los áridos artificiales de Brimstone capturan carbono y convierten el hormigón en un material carbono negativo.



Tecnología de energía solar concentrada (CSP) aplicada al cemento:

## 2.4 Desafíos en la Implementación de Áridos Alternativos

- Calidad y Homogeneidad: Garantizar la calidad constante de los áridos reciclados o artificiales es un desafío.
- Regulación y Estándares: Muchos códigos de construcción aún no permiten el uso amplio de áridos alternativos.
- Costo: La producción de áridos artificiales puede ser más cara que la extracción de áridos naturales, aunque los costos disminuyen con la escala.

### 3. Energía renovable en la producción

La producción de cemento es un proceso intensivo en energía, siendo responsable de aproximadamente un 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al hormigón. La sustitución de fuentes de energía tradicionales, como el carbón, por energías renovables o alternativas de baja emisión de carbono es crucial para reducir el impacto ambiental de este material esencial.

#### 3.1 Consumo Energético en la Producción de Cemento

La producción de cemento requiere grandes cantidades de energía para alcanzar las altas temperaturas necesarias en el proceso de calcinación del Clinker. Este proceso consume energía no solo para calentar la piedra caliza a más de 1,450 °C, sino también para mantener la operación continua de los hornos y otros equipos industriales.

- Fuentes Tradicionales de Energía: Históricamente, la industria ha dependido del carbón, petróleo y gas natural, todos ellos altamente emisores de CO<sub>2</sub>.
- Impacto Ambiental: El uso de estos combustibles fósiles contribuye significativamente al cambio climático y la contaminación del aire.

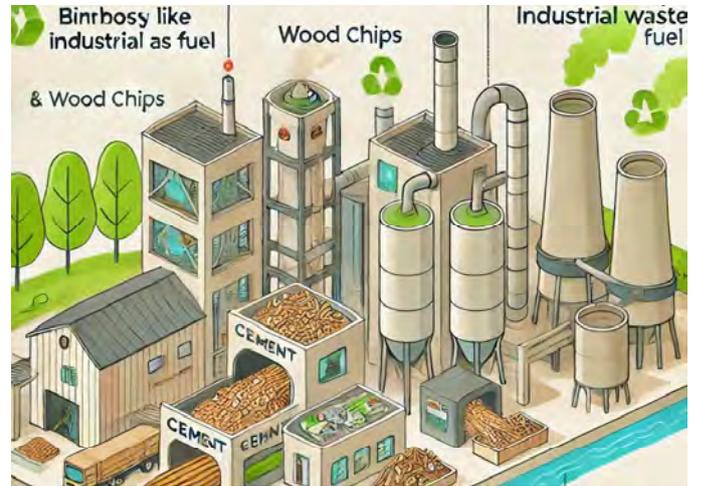
### 3.2 Transición hacia Energías Renovables

#### 3.2.1 Energía Solar Concentrada

La energía solar concentrada utiliza espejos o lentes para enfocar un gran área de luz solar en un pequeño receptor, generando el calor necesario para el proceso de calcinación.

Caso Práctico: Synhelion, en colaboración con Cemex, está desarrollando una tecnología que utiliza energía solar concentrada para alimentar los hornos de cemento. Esto no solo reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino que también disminuye la dependencia de combustibles fósiles.

**La energía solar concentrada puede sustituir combustibles fósiles en la producción de cemento.**



Uso de biomasa y residuos industriales como combustible en la producción de cemento: Ilustración de una planta de cemento que utiliza biomasa (como astillas de madera) y flujos de residuos industriales para alimentar el horno.

#### 3.2.2 Energía Eólica y Solar Fotovoltaica

Estas fuentes se utilizan principalmente para alimentar las operaciones auxiliares de las plantas de cemento, como la trituración de materias primas y la molienda del clinker.

- Impacto Positivo: Aunque no reemplazan directamente los combustibles en el horno, la integración de energía eólica y solar en las plantas reduce la huella de carbono general de la producción de cemento.

#### 3.2.3 Biomasa y Residuos Industriales

La biomasa, como residuos agrícolas y forestales, se puede utilizar como una alternativa de combustible. Los residuos industriales, incluidos los plásticos no reciclables, también están siendo evaluados como fuentes de energía.

Ejemplo en Europa: Varias plantas en Europa ya están utilizando biomasa y residuos industriales como parte de su mezcla de combustibles, logrando reducciones significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Las innovaciones en hornos de precalentamiento reducen el consumo energético de las plantas de cemento en un 20%.**

### 3.3 Innovaciones Tecnológicas en el Consumo Energético

#### 3.3.1 Hornos de Precalentamiento y Sistemas de Recuperación de Calor

Estos sistemas mejoran la eficiencia energética al reutilizar el calor generado en el proceso, reduciendo así el consumo de energía primaria.

Proyecto Destacado: Algunas plantas han implementado tecnologías avanzadas de recuperación de calor que han reducido el consumo energético en un 20%, mostrando el potencial de estas soluciones.

#### 3.3.2 Electrificación de Procesos

La electrificación total o parcial de procesos, utilizando electricidad renovable, es una dirección prometedora. Aunque actualmente es un desafío debido a la demanda energética del horno, el progreso en tecnologías de hornos eléctricos está en marcha.

### 3.4 Desafíos y Oportunidades

- Costo Inicial: La transición a energías renovables y tecnologías más limpias implica altos costos iniciales, aunque los beneficios a largo plazo incluyen menores costos operativos y reducción de emisiones.

- Adaptación Tecnológica: Las plantas existentes deben adaptarse para integrar estas nuevas tecnologías, lo que requiere tiempo y recursos.

- Regulaciones y Políticas: El apoyo gubernamental en forma de subsidios, incentivos fiscales y regulaciones estrictas es crucial para fomentar la adopción de energías limpias.



Ciudad futurista construida con hormigón de bajas emisiones:

**La biomasa y los residuos industriales son alternativas sostenibles para sustituir combustibles fósiles en la producción de cemento.**

## 4. Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS)

La captura y almacenamiento de carbono (CCS) es una de las tecnologías más prometedoras para reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria del cemento. Este enfoque implica capturar el CO<sub>2</sub> emitido durante el proceso de producción de cemento y almacenarlo de manera segura, evitando que entre en la atmósfera.

### 4.1 ¿Qué es CCS?

La tecnología de CCS captura el dióxido de carbono directamente de las fuentes industriales antes de que se libere al aire. Una vez capturado, el CO<sub>2</sub> se transporta y almacena en formaciones geológicas subterráneas, como depósitos de petróleo agotados, acuíferos salinos profundos o cavidades de roca basáltica.

### 4.2 Proceso de Captura de CO<sub>2</sub>

Existen tres enfoques principales para la captura de carbono en la industria del cemento:

#### 4.2.1 Post-combustión

Este método captura el CO<sub>2</sub> de los gases de escape después de la combustión de los combustibles fósiles. Se utiliza una sustancia absorbente que extrae el CO<sub>2</sub> del gas, el cual es luego comprimido y almacenado.



Implementación de tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS) en una planta de cemento.

#### 4.2.2 Pre-combustión

El CO<sub>2</sub> se separa antes de la combustión. Este enfoque requiere la transformación de los combustibles en un gas de síntesis (syngas), del cual se extrae el CO<sub>2</sub> antes de ser quemado.

#### 4.2.3 Oxi-combustión

Se utiliza oxígeno puro en lugar de aire en la combustión, lo que resulta en una corriente de gases de escape que es principalmente CO<sub>2</sub> y vapor de agua, facilitando la captura del CO<sub>2</sub>.

La planta de Brevik captura hasta el 90% de sus emisiones de CO<sub>2</sub>, marcando un hito en el sector.



Sistema de captura de carbono: una innovación tecnológica clave para reducir las emisiones industriales y avanzar hacia la sostenibilidad.

## 4.3 Implementación en la Industria del Cemento

### 4.3.1 Caso Práctico:

Planta de Brevik, Noruega

La planta de cemento de Heidelberg Materials en Brevik ha implementado una de las primeras instalaciones de CCS a gran escala. Esta planta captura aproximadamente el 90% de sus emisiones de CO<sub>2</sub>, utilizando una combinación de tecnologías de captura y almacenamiento.

Detalles del Proyecto:

- Capacidad de Captura: 400,000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.
- Almacenamiento: El CO<sub>2</sub> capturado se transporta al Mar del Norte para su almacenamiento en

formaciones geológicas subterráneas.

- Impacto: Este proyecto ha servido de modelo para otras plantas y ha demostrado la viabilidad técnica y económica de CCS en la industria del cemento.

### 4.3.2 Proyectos Globales

Varias plantas en Europa y América del Norte están adoptando CCS. Por ejemplo, las instalaciones de Dalmia Cement en India están probando tecnologías de captura para alcanzar emisiones netas cero.

La introducción de CO<sub>2</sub> durante la mezcla del hormigón mejora su resistencia y reduce emisiones.

#### 4.4 Beneficios y Retos de CCS

Beneficios:

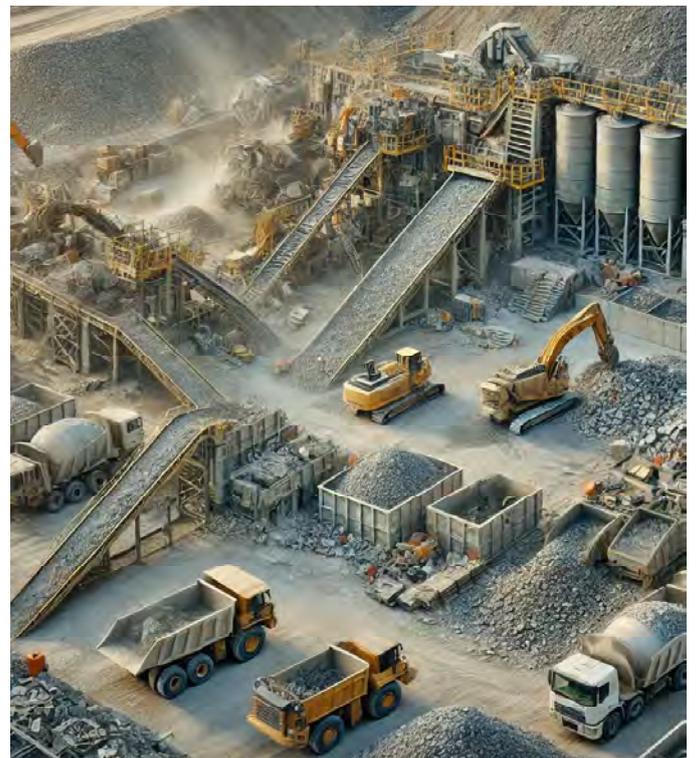
- Reducción Significativa de Emisiones: CCS puede capturar hasta el 90% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de una planta de cemento.
- Compatibilidad con Infraestructura Existente: Puede integrarse en plantas de cemento existentes con modificaciones relativamente menores.

Retos:

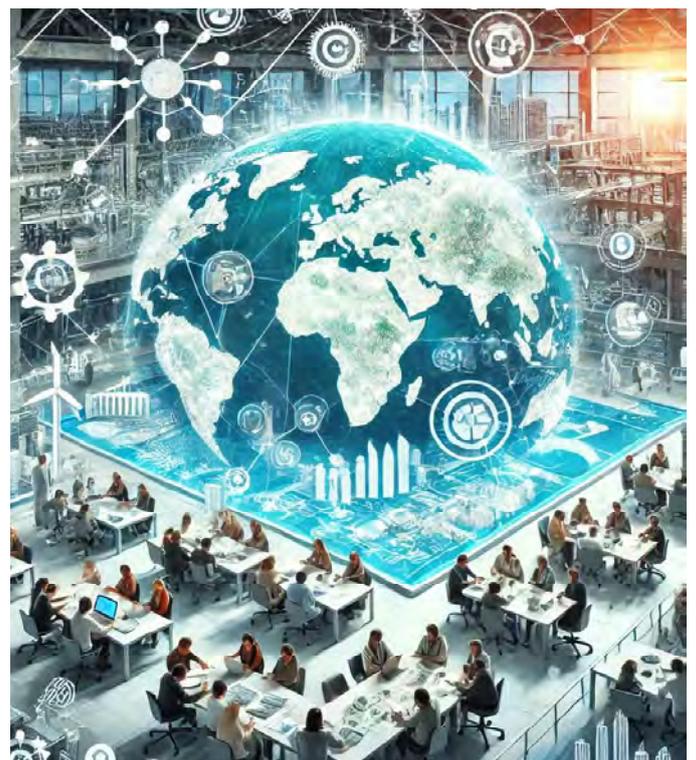
- Costos Elevados: La instalación y operación de tecnologías CCS son costosas, lo que puede ser una barrera para su adopción masiva.
- Demanda Energética: El proceso de captura y compresión de CO<sub>2</sub> es intensivo en energía, lo que puede aumentar el consumo total de energía de la planta.
- Almacenamiento Seguro: Asegurar el almacenamiento seguro y permanente del CO<sub>2</sub> capturado requiere una cuidadosa selección y monitoreo de los sitios de almacenamiento.

#### 4.5 Futuro de CCS en el Cemento

El CCS es esencial para alcanzar los objetivos de emisiones netas cero en la industria del cemento. La inversión en investigación y desarrollo, junto con políticas de apoyo y cooperación internacional, será clave para superar los retos técnicos y económicos de esta tecnología.



Reciclaje del hormigón: Visualización del proceso de reciclaje donde una estructura demolida se convierte en áridos reciclados.



Colaboración global para innovaciones en hormigón sostenible.

## Brevik y CarbonCure:

### Dos Revoluciones en el Hormigón de Bajas Emisiones.

## 5. Introducción de CO<sub>2</sub> en la Fabricación o en el vertido

Una innovación reciente en la industria del hormigón es la introducción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante el proceso de mezcla. Esta tecnología no solo reduce la huella de carbono del hormigón, sino que también mejora ciertas propiedades mecánicas del material.

### 5.1 ¿Qué es la Introducción de CO<sub>2</sub> en el Hormigón?

La tecnología de CarbonCure, por ejemplo, inyecta CO<sub>2</sub> capturado en el hormigón fresco durante su mezcla. Este CO<sub>2</sub> se mineraliza, es decir, reacciona con el calcio en el cemento para formar carbonato de calcio. Este proceso no solo fija el CO<sub>2</sub> de forma permanente dentro del hormigón, sino que también mejora su resistencia a la compresión.

### 5.2 Proceso Técnico

El CO<sub>2</sub> capturado se introduce en la mezcla de hormigón a través de un sistema controlado que asegura su distribución uniforme. Durante la hidratación del cemento, el CO<sub>2</sub> reacciona con el

óxido de calcio para formar carbonato de calcio, lo que:

- Mejora la Resistencia: El carbonato de calcio contribuye a una microestructura más densa.
- Optimiza la Mezcla: Permite una reducción en la cantidad de cemento necesaria, disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

## 5.3 Beneficios de la Introducción de CO<sub>2</sub>

### 5.3.1 Reducción de Emisiones

El proceso de mineralización del CO<sub>2</sub> en el hormigón puede reducir las emisiones en aproximadamente un 5-7% por metro cúbico de hormigón. Además, al disminuir la cantidad de cemento necesario, se contribuye aún más a la reducción de emisiones de la producción de clinker.

### 5.3.2 Mejora de las Propiedades del Hormigón

- Resistencia a la Compresión: Estudios han demostrado incrementos de hasta un 10% en la resistencia a la compresión del hormigón que ha sido tratado con CO<sub>2</sub>.
- Durabilidad: La microestructura más densa mejora la durabilidad del hormigón, haciéndolo más resistente a la permeabilidad y al ataque de agentes externos.

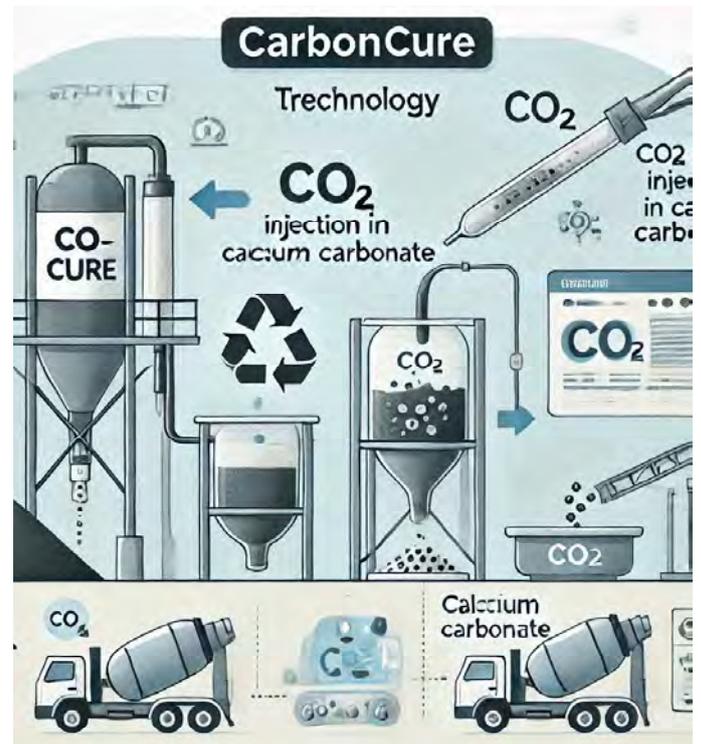


Sitio de construcción de hormigón de cero residuos, con áreas etiquetadas para reciclaje y reutilización.

La tecnología CarbonCure mineraliza CO<sub>2</sub> dentro del hormigón, mejorando su resistencia y reduciendo emisiones.



Uso de hormigón tratado con CarbonCure en obra.



Tecnología CarbonCure en la producción de hormigón: Ilustración que muestra la inyección de CO<sub>2</sub> durante la mezcla de hormigón y su transformación en carbonato de calcio.

## 5.4 Casos de Estudio

### 5.4.1 Implementación en Norteamérica

Varios productores de hormigón en Estados Unidos y Canadá han adoptado la tecnología de CarbonCure. Por ejemplo, en una planta en California, la introducción de CO<sub>2</sub> ha permitido la producción de más de 1 millón de metros cúbicos de hormigón con una huella de carbono significativamente reducida.

### 5.4.2 Proyectos Piloto en Europa

En Alemania, se están llevando a cabo proyectos piloto donde el hormigón tratado con CO<sub>2</sub> se está utilizando en la construcción de infraestructuras

públicas, como puentes y carreteras, demostrando su viabilidad en aplicaciones a gran escala.

## 5.5 Retos y Limitaciones

- Integración en Plantas Existentes: La adopción de esta tecnología requiere modificaciones en las plantas de producción de hormigón.
- Costos Iniciales: Aunque los costos operativos se reducen con el tiempo, la inversión inicial para instalar los sistemas de inyección de CO<sub>2</sub> puede ser significativa.
- Conciencia y Regulación: Todavía es necesario aumentar la conciencia en la industria y ajustar regulaciones para facilitar la adopción de esta tecnología.

## 6. Mejorar el concepto de cascading : reciclaje y Economía Circular

El concepto de cascading en el hormigón puede estar relacionado con la economía circular, pero no es exactamente lo mismo que el reciclaje de hormigón. Aquí hay una explicación detallada de cómo se diferencian y se conectan:

**El cascading maximiza el uso del hormigón en diversas aplicaciones antes de reciclarlo.**



Cascading en el uso del hormigón: Representación de un edificio modular desmontado.

### 6. 1. Cascading vs reciclaje en el contexto de la economía circular del hormigón

#### • Cascading

En economía circular, el cascading se refiere a reutilizar los materiales en diferentes niveles o aplicaciones, aprovechando su valor al máximo antes de desecharlos definitivamente. En el caso del hormigón, esto podría incluir:

- Desmontaje y reutilización directa: Por ejemplo, utilizar bloques de hormigón de una estructura antigua en un nuevo proyecto.
- Reutilización en aplicaciones de menor calidad: Si el hormigón original no puede usarse estructuralmente, se puede triturar y emplear como árido reciclado para pavimentos, rellenos, o como base en carreteras.

El cascading no necesariamente implica reciclaje completo, pero sí maximiza el aprovechamiento del material en diferentes etapas del ciclo de vida.

#### • Reciclaje de hormigón

El reciclaje es un proceso específico dentro de la economía circular que implica triturar y procesar hormigón demolido para convertirlo en áridos reciclados. Estos áridos pueden usarse en:

- Producción de nuevos hormigones, reduciendo el uso de áridos naturales.
- Aplicaciones de construcción, como bases o capas subyacentes en carreteras.

El reciclaje suele requerir procesos industriales, mientras que el cascading puede ser más flexible y artesanal.

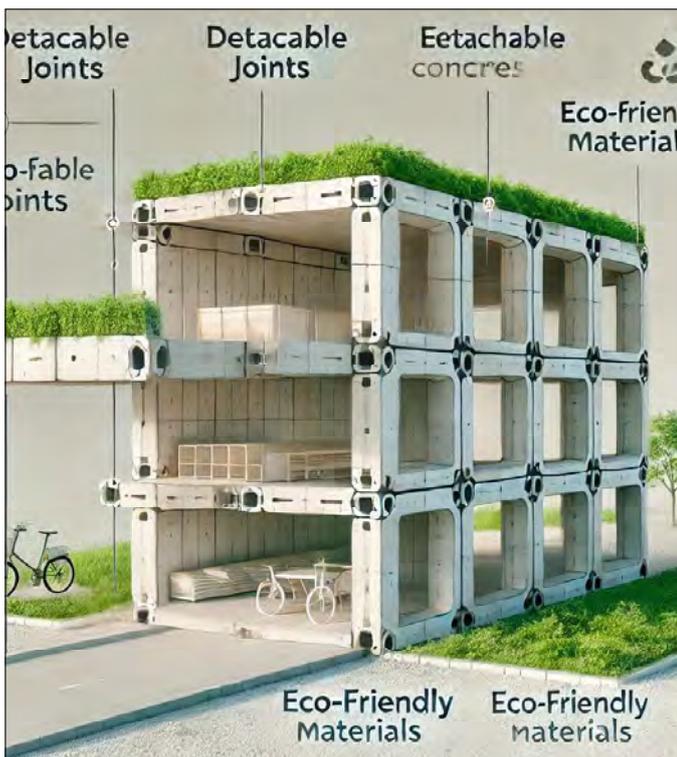
## 6.2. Relación entre ambos conceptos : cascading y reciclaje

- Complementarios: El cascading fomenta el uso de hormigón de forma escalonada antes de reciclarlo completamente. Por ejemplo, un bloque puede reutilizarse primero como estructura y, al final de su vida útil, triturarse para obtener áridos reciclados.

- Economía circular como marco: Ambos conceptos están alineados con la economía circular, que busca prolongar la vida útil de los materiales, minimizar residuos y reducir la extracción de recursos naturales.

En resumen, el cascading puede ser una etapa inicial dentro de la economía circular del hormigón, mientras que el reciclaje representa un paso final para reintroducir los materiales en el ciclo productivo. Ambos son fundamentales para lograr un sector de la construcción más sostenible.

A continuación nos adentraremos en el concepto del cascading , ejemplificado a día de hoy mayormente a través del diseño para el desmontaje .



Edificio modular diseñado para desmontaje y reutilización, representando los conceptos de sostenibilidad y diseño circular.

**La economía circular maximiza el valor del hormigón, reduciendo residuos y conservando recursos.**

## 6.3 Diseño para el Desmontaje

Este enfoque busca facilitar la recuperación de materiales al final de la vida útil de una estructura. Los edificios diseñados para el desmontaje pueden ser deconstruidos en lugar de demolidos, permitiendo la reutilización de componentes como vigas de acero, paneles de hormigón y otros elementos estructurales.

Caso Estudio: En Japón, varios edificios han sido diseñados con un enfoque en el desmontaje, permitiendo la reutilización de hasta el 90% de sus materiales en nuevas construcciones.

A continuación nos adentraremos en el concepto del reciclaje de hormigón.



Paisaje urbano futurista con edificios modulares de hormigón y espacios verdes integrados.

## 6.4 Reciclaje del Hormigón

El hormigón reciclado proviene principalmente de estructuras demolidas. Este material es triturado y clasificado para ser reutilizado como áridos en nuevas mezclas de hormigón o como base en proyectos de infraestructura vial.

### 6.4.1 Procesos de Reciclaje

El hormigón armado se reutiliza principalmente a



Bloque de hormigón reciclado siendo probado en un laboratorio para medir su resistencia estructural.

través de la trituración para separar el hormigón del acero, permitiendo usar el hormigón triturado como árido reciclado y el acero recuperado en nuevas estructuras. También es posible reutilizar elementos prefabricados en buen estado, como vigas o paneles, en nuevas construcciones o rehabilitaciones, y procesarlo in situ para reducir transporte y emisiones. Además, puede transformarse en productos secundarios, como bloques de contención o materiales para paisajismo, contribuyendo a la economía circular y la sostenibilidad en la construcción.

1. Trituración: El hormigón demolido se tritura en fragmentos más pequeños.

2. Clasificación: Los fragmentos se clasifican por tamaño para diferentes aplicaciones.

3. Reutilización: Los áridos reciclados se mezclan con cemento nuevo para producir hormigón reciclado o se utilizan como base en construcciones viales.

### 6.4.2 Aplicaciones Comunes

- Bases de Carreteras y Rellenos: Los áridos reciclados son ampliamente utilizados en la construcción de carreteras.

- Hormigón Estructural: Aunque menos común, el hormigón reciclado se utiliza cada vez más en aplicaciones estructurales, gracias a mejoras en las técnicas de procesamiento.

Ejemplo: En los Países Bajos, se ha utilizado hormigón reciclado en la construcción de nuevas carreteras y edificios, promoviendo un modelo de construcción sostenible.

## 6.5 Beneficios del Reciclaje de Hormigón

- Reducción de Residuos en Vertederos: Reciclar el hormigón reduce significativamente los residuos de construcción y demolición que terminan en vertederos.

- Conservación de Recursos Naturales: Al reutilizar áridos reciclados, se reduce la necesidad de extraer áridos naturales.

- Menor Huella de Carbono: El proceso de reciclaje consume menos energía que la extracción y transporte de nuevos materiales, reduciendo así las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## 6.6 Retos en la Implementación

- Calidad y Homogeneidad: Asegurar la calidad y

**El hormigón reciclado reduce la demanda de áridos naturales y disminuye los residuos en vertederos.**

consistencia de los materiales reciclados es un desafío constante.

- Regulación y Estándares: Los códigos de construcción en muchas regiones todavía están en proceso de actualizarse para permitir el uso de hormigón reciclado en aplicaciones estructurales.

**Edificios  
modulares  
diseñados para  
desmontaje  
integran  
sostenibilidad y  
flexibilidad en la  
construcción.**



Paisaje urbano con el uso innovador de hormigón reciclado en estructuras modulares, con prácticas de sostenibilidad claramente resaltadas.

- Costos y Viabilidad: Aunque el reciclaje reduce los costos a largo plazo, los costos iniciales de clasificación y procesamiento pueden ser elevados.

## **6.7 Futuro del Reciclaje en la Industria del Hormigón**

A medida que las tecnologías de reciclaje mejoren y los marcos regulatorios se adapten, se espera que el uso de hormigón reciclado se convierta en una práctica estándar en la industria. La economía circular no solo reducirá el impacto ambiental del hormigón, sino que también ofrecerá beneficios económicos significativos al sector.

**Un esfuerzo conjunto entre industria, gobiernos y academia puede redefinir el papel del hormigón en la sostenibilidad.**

## **7. Conclusión**

El hormigón, como material esencial en la construcción moderna, está en el centro de una transformación crucial hacia la sostenibilidad. A lo largo de este informe, hemos explorado cómo innovaciones en la producción de cemento, el uso de materiales alternativos, la adopción de energías renovables, y la integración de tecnologías de captura de carbono están redefiniendo el papel del hormigón en un mundo que busca reducir su huella de carbono.

### **7.1 El Hormigón en un Contexto de Sostenibilidad**

La importancia del hormigón en la infraestructura global es indiscutible. Desde rascacielos hasta puentes, este material ha sido fundamental para el desarrollo humano. Sin embargo, su impacto ambiental, particularmente en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, ha llevado a la industria a una encrucijada. Los avances en la reducción del clinker, la sustitución de áridos, y la implementación de tecnologías limpias son pasos esenciales para mantener el hormigón relevante en un futuro sostenible.

### **7.2 Innovaciones Clave y su Impacto**

- Reducción del Clinker: La transición hacia materiales como el LC3 puede disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 40%, mostrando un camino claro hacia un cemento más limpio.
- Sustitución de Áridos: El uso de áridos reciclados y artificiales no solo conserva los recursos naturales, sino que también promueve una economía circular en la construcción.
- Energías Renovables: La incorporación de energías como la solar y la eólica en la producción de cemento reduce significativamente su huella de carbono.
- Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>: CCS es una solución potente para mitigar las emisiones de procesos, con proyectos pioneros como el de Brevik demostrando su viabilidad.
- Introducción de CO<sub>2</sub> en el Hormigón: Esta innovación no solo encapsula el carbono, sino que también mejora las propiedades del hormigón, ofreciendo un doble beneficio.

**El futuro del hormigón sostenible se fundamenta en la reutilización de materiales existentes, el reciclaje de componentes para nuevas aplicaciones y la implementación de un diseño circular que maximice su vida útil y minimice su impacto ambiental.**



Puente urbano ecológico construido con hormigón reciclado, integrando elementos de diseño moderno, pasarelas peatonales y espacios verdes.

### 7.3 Hacia un Futuro Más Verde

El camino hacia un hormigón más sostenible no está exento de desafíos. Las barreras económicas, técnicas y regulatorias deben ser superadas mediante la colaboración entre gobiernos, industria y academia. La inversión en investigación y el desarrollo de políticas de apoyo serán cruciales para escalar estas soluciones innovadoras.

**Reflexión Final:** A medida que avanzamos hacia 2050, la adopción generalizada de estas tecnologías será fundamental para reducir las emisiones de carbono del sector de la construcción. El hormigón, con todas sus cualidades esenciales, puede y debe evolucionar para convertirse en un aliado en la lucha contra el cambio climático. La pregunta que debemos hacernos es: **¿Estamos preparados para liderar esta transformación de los materiales tradicionales y redefinir el futuro de la construcción?**