

## Entre el verde y el gris: descarbonización del cemento Portland y la durabilidad del hormigón – una revisión crítica.

E. Possan<sup>1\*</sup> 

\*Autor de Contacto: [epossan@email.com](mailto:epossan@email.com); [edna.possan@unila.edu.br](mailto:edna.possan@unila.edu.br)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.978>

Recibido: 30/10/2025 | Correcciones recibidas: 17/11/2025 | Aceptado: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

### RESUMEN

Este artículo presenta una revisión crítica de la descarbonización del cemento Portland (CP) y sus implicaciones para la durabilidad del hormigón. La reducción del contenido de clínker, estrategia central para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>, ha sido acompañada de ajustes fisicoquímicos que aumentan la reactividad del CP, elevando el calor de hidratación y el riesgo de reacciones expansivas. Además, la menor reserva alcalina de los cementos de menor emisión acelera la carbonatación, lo que aumenta la probabilidad de corrosión de las armaduras. Estas y otras cuestiones deben considerarse en el proceso de descarbonización, lo que evidencia la necesidad de estudios sistémicos que aborden las compensaciones entre la reducción de CO<sub>2</sub> y la durabilidad a lo largo de la vida útil de las estructuras de hormigón.

**Palabras clave:** cementos de baja emisividad; durabilidad; vida útil; cambio climático.

**Citar como:** Possan, E. (2026), "Entre el verde y el gris: descarbonización del cemento Portland y la durabilidad del hormigón – una revisión crítica.", Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 41 – 58, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.978>

<sup>1</sup> Programa de pós-graduação em Engenharia Civil (PPGECI), Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila), Foz do Iguaçu, Brasil.

### Contribución de cada autor

La autora Edna Possan trabajó en todo el desarrollo de este artículo.

### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2026.

## Between green and gray: decarbonization of Portland cement and durability of concrete – a critical review.

### ABSTRACT

This paper presents a critical review of the decarbonization of Portland cement (PC) and its implications for concrete durability. The reduction of clinker content, a central strategy to mitigate CO<sub>2</sub> emissions, has been accompanied by physicochemical adjustments that increase PC reactivity, leading to higher heat of hydration and a greater risk of expansive reactions. Moreover, the lower alkaline reserve of low-carbon cement accelerates carbonation, increasing the probability of steel reinforcement corrosion. These and other issues must be considered in the decarbonization process, highlighting the need for systemic studies that address the trade-offs between CO<sub>2</sub> reduction and long-term durability over the service life of concrete structures.

**Keywords:** low-emission cements, durability performance, service life, climate change.

### Entre o verde e o cinza: descarbonização do cimento Portland e durabilidade do concreto – uma revisão crítica.

### RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão crítica sobre a descarbonização do cimento Portland (CP) e suas implicações para a durabilidade do concreto. A redução do teor de clínquer, estratégia central para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub>, tem sido acompanhada por alterações físico-químicas que elevam a reatividade do CP, aumentando o calor de hidratação e o risco de reações expansivas. Ademais, a menor reserva alcalina acelera a carbonatação, elevando o risco de corrosão das armaduras. Estas e outras questões devem ser consideradas no processo de descarbonização, sendo necessários estudos sistêmicos que abordem as compensações entre a redução de CO<sub>2</sub> e a durabilidade ao longo do ciclo de vida das estruturas de concreto.

**Palavras-chave:** cimentos menos emissivos; desempenho de durabilidade, vida útil, mudanças climáticas.

#### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industrialización iniciada en el siglo XVIII trajo consigo numerosos avances para la humanidad, entre ellos el desarrollo del cemento Portland, que desde entonces se ha consolidado como uno de los principales materiales de construcción. No obstante, este proceso también desencadenó impactos ambientales significativos y de larga duración. Las concentraciones de carbono atmosférico aumentaron de forma exponencial, pasando de 280 ppm en 1800 a 428 ppm en 2025 (NOAA, 2025), lo que ha provocado alteraciones climáticas relevantes e indeseables, como el calentamiento global, fenómeno directamente asociado a la concentración atmosférica de este gas. Paralelamente, entre 1800 y 2025 la población mundial se incrementó aproximadamente de 1 a 8,1 mil millones de personas bilhões (Population Matters, 2025), y se estima que en 2050 la Tierra alcanzará los 9,8 mil millones de habitantes (United Nations, 2017), con demandas crecientes, que van desde alimentos hasta materiales de construcción, elementos esenciales para la supervivencia humana.

Esta expansión demográfica intensifica la presión sobre los recursos naturales, especialmente en lo relativo a la expansión y la adecuación del entorno construido. El entorno construido está conformado por los espacios de habitación (viviendas unifamiliares y colectivas), la infraestructura de apoyo y de recreo (hospitales, guarderías, escuelas, parques, centros comerciales, clubes, entre otros), la infraestructura productiva (industrias, comercios, centros de distribución) y la de movilidad (carreteras, aeropuertos, puertos, vías navegables, etc.). En consecuencia, la demanda efectiva de recursos materiales tiende a crecer de manera intensiva a medida que aumenta la población, lo que, bajo los modelos actuales de producción y consumo (*business as usual*), se asocia directamente con el consumo energético y las emisiones de carbono.

Entre los materiales críticos en este proceso destaca el cemento Portland (CP), principal componente reactivo del hormigón, uno de los materiales más consumidos a escala mundial, con un promedio global de 563 kg por habitante y año (Kumar, 2020), con perspectivas de elevación debido al crecimiento demográfico y a las crecientes demandas de infraestructura urbana y habitacional. La problemática ambiental asociada al cemento Portland se debe a su elevado consumo, que, a su vez, conlleva altas emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a su proceso de producción (Habert et al., 2020; Olivier & Paters, 2020; Rissman et al., 2020). Para la fabricación de una tonelada de clíker se emiten entre 850 y 1.000 kg de CO<sub>2</sub> (Habert & Roussel, 2009; Possan, 2019), de los cuales aproximadamente el 60–65 % corresponde a emisiones de origen químico, derivadas de la descarbonatación de la roca caliza durante el proceso de clinkerización, y el 30–40 % restante procede del uso de combustibles fósiles (Adesina, 2020; Possan, 2019; ROADMAP BRASIL, 2019a). Estos indicadores, asociados al elevado consumo de CP, hacen que la industria cementera sea responsable de aproximadamente el 5–8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Hansen et al., 2023; IPCC, 1992), situándola como un sector clave en la lucha contra el cambio climático. Para alcanzar las emisiones netas cero en 2050, conforme a lo establecido en el Acuerdo de París (United Nations, 2015), resulta necesaria la implementación progresiva de un conjunto de medidas. Estas acciones se relacionan tanto con el proceso de producción del CP, como la mejora de la eficiencia energética, el uso de combustibles renovables y la captura de carbono, como con el material en sí, mediante el incremento de la reactividad del Clinker a través de procesos fisicoquímicos que permitan la reducción del contenido de Clinker en el cemento y el empleo de mayores proporciones de materiales cimenticios suplementarios (MCS) y fílers.

En este sentido, diversos *roadmaps* han sido publicados por industrias y asociaciones del sector cementero a escala mundial global (IEA/CSI, 2009; ROADMAP BRASIL, 2019a; WBCSD, 2018b), en los que se presentan los planes de acción necesarios a lo largo del tiempo para la descarbonización del cemento Portland. Las primeras medidas, ya implementadas o en fase de implementación, se centran en la reducción de emisiones, con énfasis en la mejora de la eficiencia energética, el cambio de combustibles y la reducción del contenido de clínker en el cemento, ya

que se trata de acciones de menor coste de implementación. Las acciones de mayor impacto se encuadran en el ámbito de la remoción de carbono y están previstas para su implementación a partir de 2030, incluyendo las tecnologías de CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage*), que aún se encuentran en fase de desarrollo y requieren costes de instalación elevados. Las técnicas de CCUS se consideran fundamentales para la descarbonización global (Coffetti et al., 2022; Emanuelsson et al., 2025; S. Kumar et al., 2025; Nehdi et al., 2024), consolidándose como soluciones de interés en los mercados de carbono, vigentes en más de 20 países a nivel mundial, principalmente en la Unión Europea (Dolphin and Merkle, 2025), y recientemente implantadas en Brasil mediante la Ley nº 15.042, de diciembre de 2024 (Brasil, 2024).

En relación con las acciones en curso orientadas a la descarbonización del CP, el presente artículo aborda exclusivamente los aspectos de la estrategia de reducción del contenido de clínker en el cemento Portland como vía para promover la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector cementero, evaluando sus efectos sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón producidas con cementos de menor huella de carbono. Para la implementación de esta estrategia, Habert et al. (2020), Kumar et al. (2025) e Juenger et al. (2019) destacan que actualmente se emplean materiales cimenticios suplementarios (MCS), ya sean reactivos o inertes, en sustitución parcial del clínker, principalmente cenizas volantes, escorias de alto horno, arcillas calcinadas y fíler calizo.

Los dos primeros productos son materiales residuales reactivos procedentes, respectivamente, de centrales termoeléctricas y de la industria siderúrgica, y se consideran neutros en carbono. No obstante, según Scrivener et al. (2018), estos materiales se generan en volúmenes insuficientes para satisfacer la escala de producción requerida, con una disponibilidad limitada a las cadenas productoras. En este contexto, la utilización de arcillas calcinadas y de fílers ha cobrado protagonismo debido a la amplia disponibilidad de materias primas y, a pesar de requerir procesos de calcinación (en el caso de las arcillas) y de molienda (tanto para el fíler como para las arcillas), presentan emisiones de CO<sub>2</sub> inferiores a las del clínker Portland, constituyéndose como una alternativa prometedora para la descarbonización del sector cementero.

Los fílers han destacado especialmente en este escenario, dado que dependen únicamente de los procesos de extracción y molienda, lo que los hace menos emisivos y más económicos que el CP (Scrivener et al., 2018). Al tratarse de materiales inertes, en aplicaciones en matrices no empaquetadas y sin el uso de aditivos, los fílers no contribuyen a las reacciones químicas del CP ni al incremento de la resistencia mecánica de los materiales cimenticios a lo largo del tiempo (Oliveira et al., 2023). En consecuencia, sin la asociación de un adecuado empaquetamiento de partículas y el uso de agentes dispersantes activos, la incorporación de mayores contenidos de fílers, así como de elevadas proporciones de MCS, puede exigir a la industria la implementación de modificaciones fisicoquímicas destinadas a incrementar la reactividad tanto del clínker como del CP.

El incremento de la reactividad del cemento, incluso tras la dilución derivada del uso de MCS en sustitución del clínker, tiene implicaciones en el aumento del calor de hidratación, lo que eleva el riesgo de manifestaciones patológicas, especialmente fisuración de origen térmico, que puede aparecer a edades tempranas, además de favorecer la aparición de DEF (*Delayed Ettringite Formation*), observada a edades más avanzadas bajo determinadas condiciones específicas.

En este contexto, evaluar cómo la descarbonización del CP puede afectar la durabilidad de las estructuras de hormigón constituye un tema de investigación relevante y aún poco explorado, dado que la literatura ofrece escasos estudios sistémicos al respecto. En consecuencia, el presente artículo presenta una revisión crítica basada en estudios recientes e iniciativas sectoriales, con especial énfasis en las principales rutas de descarbonización de la industria cementera, y, en particular, en la reducción del factor clínker mediante el uso de materiales cimenticios suplementarios (MCS). Asimismo, el trabajo analiza el estado actual del proceso de descarbonización del cemento Portland (CP) y discute sus posibles implicaciones en la durabilidad de las estructuras de hormigón.

## 2. DESARROLLO Y EMISIONES DE CARBONO

El Homo sapiens, a lo largo de millones de años, ha descubierto, perfeccionado y aplicado diversas tecnologías que lo han conducido al estadio actual de su desarrollo. Puede afirmarse que la humanidad ha desarrollado un conjunto de tecnologías de alcance mundial que han provocado profundas transformaciones sociales, culturales y ambientales. En este recorrido, se observa una trayectoria evolutiva que se extiende desde el desarrollo del lenguaje, hace aproximadamente 6 millones de años, hasta la ingeniería genética y la inteligencia artificial generativa de la actualidad (figura 1). En este intervalo, se desarrollaron herramientas de piedra, el dominio del fuego, la agricultura, la escritura, la imprenta, el motor de combustión interna, internet, entre otras tecnologías fundamentales.

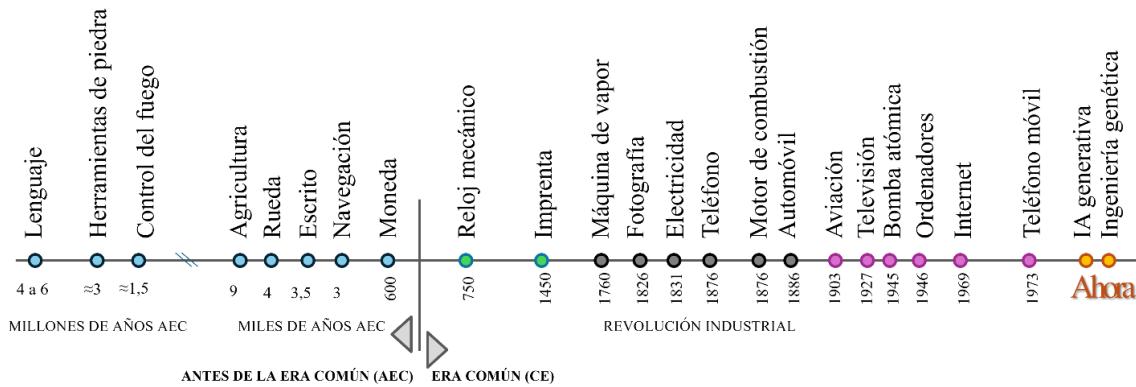


Figura 1. Tecnologías de alcance mundial que cambiaron el mundo (elaborado a partir de la lectura de las obras de Harari, 2020, 2024; Suleyman & Bhaskar, 2023).

Tras la Revolución Industrial, se concentra el mayor número de descubrimientos transformadores, en su mayoría asociados a la mayor disponibilidad de energía, lo que permitió un amplio desarrollo tecnológico. No obstante, este desarrollo acelerado, sustentado en un sistema energético basado en combustibles fósiles, principalmente carbón y petróleo, así como en la extracción de recursos naturales no renovables para satisfacer una demanda de consumo que excede la necesidad de subsistencia humana, ha conducido a un incremento exponencial de las emisiones de carbono y al crecimiento de la población mundial (Figura 2).

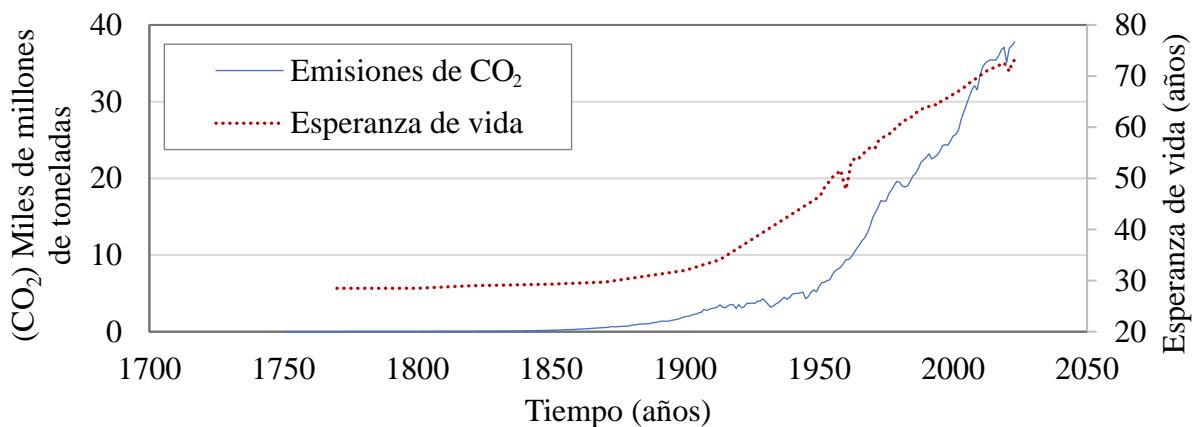


Figura 2. Emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Ritchie & Roser, 2025) y esperanza de vida (Dattani et al., 2025) desde la Revolución Industrial hasta la actualidad.

El calentamiento global ha sido asociado por científicos de todo el mundo al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Si bien el calentamiento global constituye un ciclo natural,

Entre el verde y el gris: descarbonización del cemento Portland y la durabilidad del hormigón – una revisión crítica.

la era actual presenta una aceleración sin precedentes y alarmante, con registros que superan los registrados en períodos anteriores. En menos de 200 años, las actividades humanas han incrementado en aproximadamente un 50 % la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (NASA, 2025). En la actualidad, la concentración media global de CO<sub>2</sub> alcanza el valor más elevado registrado en millones de años (NASA, 2025). Asimismo, bajo el enfoque geopolítico global vigente en materia de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el calentamiento global superará los 1,5 °C en la década de 2020 y los 2 °C antes de 2050 (Hansen et al., 2023).

Por otro lado, estos desarrollos han contribuido significativamente al incremento de la esperanza de vida, que entre 1770 y 1870 se situaba en torno a los 29 años, y que aumentó hasta aproximadamente 50 años en 1950 y 73 años en 2023 (Dattani et al., 2025). El aumento de la esperanza de vida se asocia a la mejora de las condiciones de vida, incluyendo la disponibilidad de alimentos, el acceso a la calefacción, medicamentos, vacunas, entre otros factores (OECD, 2024). Según el historiador Harari (2020), la ingeniería genética podría, aun en el presente siglo, incrementar de forma significativa la longevidad humana, especialmente para aquellas personas con acceso a sistemas de salud preventiva.

Sin embargo, estas poblaciones longevas necesitarán un planeta vivo. Los escenarios actuales no son optimistas. En comparación con la era preindustrial, el calentamiento global ha provocado una reducción del número de días con aire limpio (Choi et al., 2024), el derretimiento de los casquetes polares y el aumento del nivel del mar (Koutroulis, 2019), así como un incremento en la intensidad de las precipitaciones y de los eventos climáticos extremos, como el ocurrido en la ciudad de Porto Alegre, Brasil en 2024, entre otros efectos asociados al cambio climático. En 2024, se superó el objetivo más optimista del IPCC, que establecía un límite de 1,5 °C de aumento de la temperatura media global para 2030 respecto a la era preindustrial (NOAA/ESRL, 2025). En 2025, Estados Unidos se retiró del Acuerdo de París, el acuerdo global destinado a mitigar los efectos del calentamiento global, pese a ser uno de los países con mayores niveles de emisiones. Además, el mundo parece encontrarse en la antesala de nuevos conflictos armados, acciones que retrasan el proceso de contención del carbono que la humanidad necesita impulsar con carácter de urgencia. Este es el escenario global en 2025.

El crecimiento demográfico y las tendencias globales de desarrollo previsiblemente intensificarán la demanda de cemento, incrementando las emisiones de CO<sub>2</sub> de un sector que ya se encuentra entre los más difíciles de descarbonizar (Olsson et al., 2023; Shah et al., 2022). La cuestión central en la actualidad es cómo continuar el desarrollo de la humanidad, al tiempo que se implementa, de forma paralela, la contención de carbono necesaria para frenar o minimizar el calentamiento global, con el fin de garantizar la continuidad de la vida tal como la conocemos hoy en el planeta Tierra. Los optimistas tecnicistas sostienen que se desarrollará alguna tecnología capaz de resolver este desafío; sin embargo, mientras no deje de ser una utopía, a la humanidad solo le queda confiar en una toma de conciencia colectiva a favor del planeta. En este contexto, la industria de la construcción se verá llamada a responder a dos necesidades humanas aparentemente incompatibles: preservar el medio ambiente y, simultáneamente, sostener el crecimiento poblacional, proporcionando vivienda e infraestructuras, así como promoviendo la reconstrucción en regiones afectadas por conflictos. El cemento Portland, al ser uno de los materiales de construcción más utilizados, adquiere una relevancia particular en el proceso de descarbonización, constituyendo el objeto de análisis del presente artículo.

### 3. CEMENTO, HORMIGÓN Y DURABILIDAD

El cemento y el hormigón constituyen hitos del desarrollo contemporáneo. Destacan por su amplio potencial de aplicación en la producción de materiales cementicios, como pastas, morteros y hormigones, que pueden fabricarse en prácticamente cualquier lugar mediante la simple adición de agua y/o áridos (Mehta & Monteiro, 2014), pudiendo incorporar aditivos y otros componentes

cuando se requiere la producción de hormigones especiales. En la producción de hormigón convencional, el CP suele emplearse en menores proporciones que los áridos ( $\approx 15\%$ ); sin embargo, como se muestra en la figura 3, es responsable de hasta el 90 % de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> asociadas al material.

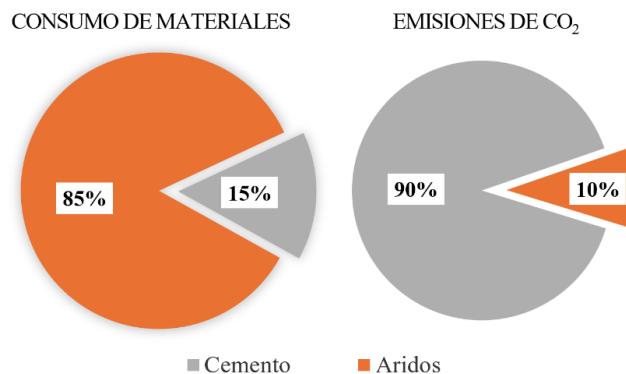


Figura 3. Consumo de materiales y emisiones de CO<sub>2</sub> del cemento y de los áridos para la producción de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional (fck 20 – 50 MPa), compilado a partir de Goulart (2023).

Se entiende que promover la descarbonización en la cadena del hormigón resulta más complejo que en la industria cementera. En Brasil, existen alrededor de un centenar de fábricas de cemento en el territorio nacional, un número significativamente inferior al de plantas dosificadoras de hormigón, presentes en la mayoría de los municipios brasileños, con múltiples unidades en las ciudades de mayor tamaño; esta capilaridad hace que el proceso sea más complejo. Dado que la mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la cadena de productos y servicios de materiales a base de cemento proviene del CP (figura 4), las estrategias de descarbonización de la cadena del hormigón se orientan hacia la optimización de procesos, el correcto proporcionamiento de los materiales, el empleo de nuevos métodos de dosificación y el uso de áridos con menor huella de carbono. No obstante, considerando la magnitud del sector, la percepción es que los avances en esta dirección siguen siendo lentos.

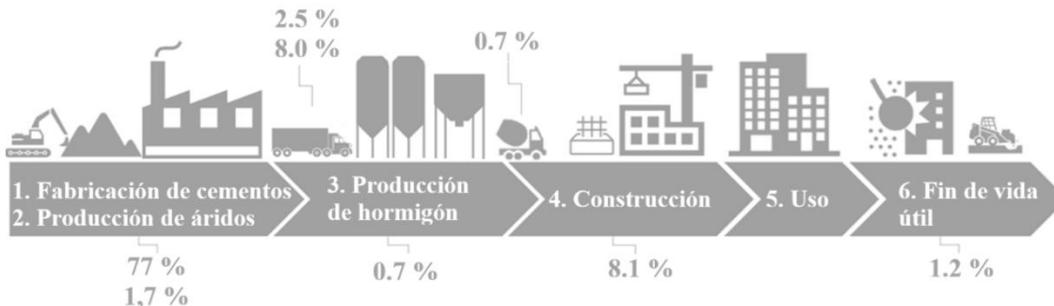


Figura 4. Emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo del ciclo de vida del cemento y del hormigón (Climateworks, 2025).

Por otro lado, el sector cementero viene implementando desde hace años estrategias de descarbonización, especialmente aquellas con alto potencial competitivo para reducir los costes de producción mediante la disminución del contenido de clínker en el cemento. En los principales roadmaps del sector cementero, tanto a nivel nacional (ROADMAP BRASIL, 2019) como internacional (WBCSD, 2018), se destacan como estrategias de descarbonización del cemento soluciones tales como la reducción del contenido de clínker, derivada de su sustitución por materiales de menor huella de carbono, la mejora de la eficiencia energética en los procesos productivos y la sustitución de combustibles en los hornos.

La literatura indica que la sustitución del clínker por MCS puede reducir hasta 1,3 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>eq en 2018 (Shah et al., 2022). En la figura 5 se observa el estado de implementación de

Entre el verde y el gris: descarbonización del cemento Portland y la durabilidad del hormigón – una revisión crítica.

esta estrategia en Brasil. Se constata que desde finales del siglo pasado se ha producido una reducción progresiva del contenido de clínker en el CP, lo que se traduce directamente en una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al material. En la actualidad, la relación clínker-cemento es de aproximadamente 0,62, con una proyección de alcanzar 0,52 en 2050, lo que permitiría la producción de cementos con emisiones inferiores a 375 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada (ROADMAP BRASIL, 2019). La literatura señala que el incremento de la finura y/o el aumento del contenido de C<sub>3</sub>S y C<sub>3</sub>A del cemento son estrategias que pueden emplearse para elevar la reactividad del CP (Bentz; Sant; Weiss, 2008).

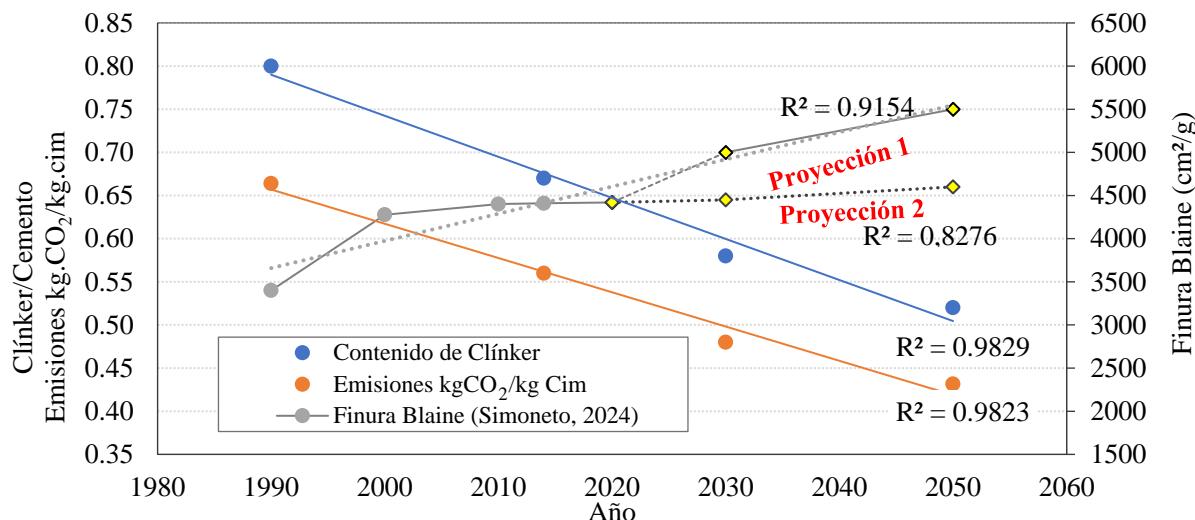


Figura 5. Reducción del contenido de clínker en el cemento según el Roadmap Brasil (2019) y variación de la finura Blaine a lo largo de los años (Simoneto, 2024).

Para comprender cómo es posible este proceso de sustitución manteniendo la resistencia a compresión del cemento a los 28 días, Simoneto (2024) desarrolló un estudio estadístico basado en resultados secundarios de trabajos publicados en los últimos 30 años que emplearon diferentes cementos Portland brasileños. El autor constató que, en paralelo a la reducción del factor clínker, se observa un incremento de la finura Blaine del cemento (figura 5, línea gris). En 1990, la finura del CP brasileño era del orden de 3400 cm<sup>2</sup>/g y el contenido de clínker era de 0,79. En 2020, la finura media alcanza aproximadamente 4420 cm<sup>2</sup>/g, mientras que el contenido de clínker se reduce a 0,65. A partir de la proyección de los datos, con un R<sup>2</sup> de 0,91, la finura media del CP podría aproximarse a 5500 cm<sup>2</sup>/g en 2050 para un contenido de clínker de 0,52. De hecho, Simoneto (2024) verificó que algunos cementos brasileños ya presentan índices de finura próximos a los previstos para 2050, en particular el CP V ARI (Cemento Portland de Alta Resistencia Inicial) y el CP II-F 40 (cemento Portland compuesto con fíler, clase 40 MPa). Estas modificaciones se intensifican a partir de 2018, con la actualización de las normas de cemento, sustituidas por la NBR 16697 (ABNT, 2018), que permite niveles más altos de sustitución del clínker por fílers y MCS.

La mayor superficie específica de las partículas del cemento puede derivarse de una molienda más intensa del clínker, del uso de fílers o de materiales cementicios suplementarios (MCS) de elevada finura, y/o de la combinación de ambos factores. No obstante, en el estudio de Simoneto (2024), debido al método empleado para la recopilación de datos secundarios, no fue posible identificar el origen específico de dicha finura. Desde hace décadas se reconoce que los cementos con elevada área superficial requieren un mayor consumo de agua y generan una mayor cantidad de calor durante el proceso de hidratación (Mehta & Monteiro, 2014), lo que exige cuidados especiales tanto en la producción como en el vertido de grandes volúmenes, especialmente en elementos poco esbeltos, como bloques, con el fin de evitar problemas asociados a la demanda de agua y a la liberación de calor.

En otro estudio, Funahashi et al. (2024) recopilaron aproximadamente 1.700 resultados primarios. Entre el verde y el gris: descarbonización del cemento Portland y la durabilidad del hormigón – una revisión crítica

(análisis fisicoquímicos y ensayos de calor de hidratación mediante el método de la botella de Langavant, hasta 168 horas) correspondientes a cementos brasileños CP II-E y CP III (ABNT, 2018), producidos durante las últimas dos décadas (2004–2024) por cinco fabricantes distintos (A, B, C, D y E). Los autores también constataron un incremento de la finura Blaine a lo largo del tiempo (figura 6), lo que corrobora los resultados obtenidos por Simoneto (2024). Para el CP II-E, se observa un aumento del calor de hidratación con el paso del tiempo, mientras que en el CP III, a pesar de la dispersión de los resultados, se identifica una tendencia a la reducción del calor de hidratación.

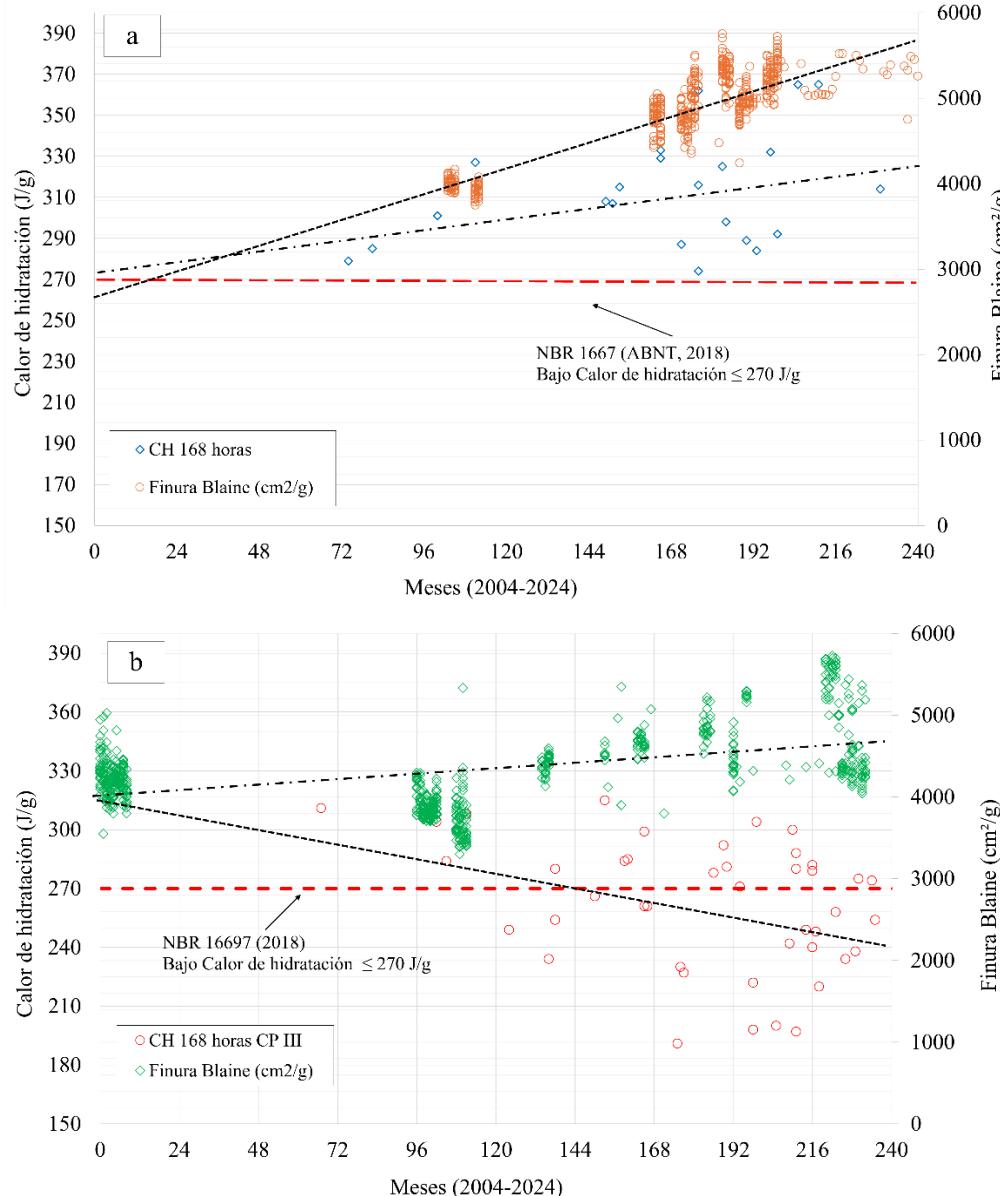


Figura 6. Finura Blaine y calor de hidratación (CH) del cemento: a) CP II-E y b) CP III, analizados entre 2004 y 2024 (Funahashi Jr et al., 2024).

Para el cemento CP III, a pesar del incremento de la finura Blaine, se constató una reducción en la generación de calor en los últimos años, lo que puede estar asociado al aumento del contenido de escoria de alto horno empleada como MCS (Funahashi Jr. et al., 2024). Además del aumento del calor de hidratación, se identificó un incremento en el contenido de  $\text{SO}_3$ , especialmente en el cemento Portland compuesto con escoria (CP II-E). A partir de los valores medios de los ensayos previos a la modificación de la normativa de cementos en 2018, Funahashi et al. (2024) verificaron un aumento del 21 % y del 28 % en el contenido de  $\text{SO}_3$  para los cementos CP II-E y CP III,

Entre el verde y el gris: descarbonización del cemento Portland y la durabilidad del hormigón – una revisión crítica.

respectivamente. Asimismo, se observó una reducción de los contenidos de MgO y de álcalis en el cemento CP II-E, así como una tendencia al incremento de los contenidos de MgO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en el cemento CP III. Los resultados de Funahashi et al. (2024) y Simoneto (2024), desarrollados a partir de estrategias de investigación diferentes y bases de datos independientes, indican que los cementos Portland brasileños han experimentado modificaciones fisicoquímicas relevantes en los últimos años, lo que exige que el proyectista las conozca e incorpore soluciones de diseño y especificaciones del hormigón orientadas a minimizar los efectos de dichas alteraciones. Uno de los efectos asociados es la DEF (*Delayed Ettringite Formation*), y para evitar su aparición la literatura recomienda no superar temperaturas de 60 y/o 65 °C Haspryk et al., 2023). Además de la finura, la composición química del cemento desempeña un papel fundamental en el desarrollo de reacciones expansivas. Los cementos con mayores contenidos de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) asociados a niveles elevados de SO<sub>3</sub> presentan un mayor riesgo de ataque por sulfatos y de desarrollo de DEF (Funahashi Jr et al., 2024; Haspryk et al., 2023). Como medida preventiva orientada a la durabilidad, los autores destacan que las relaciones SO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y (SO<sub>3</sub>)<sup>2</sup>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deben ser inferiores a 0,50 y 2,0, respectivamente.

Además de las cuestiones anteriormente mencionadas, la reducción del contenido de clínker disminuye la reserva alcalina del cemento, lo que permite mayores velocidades de difusión del CO<sub>2</sub> hacia el interior del hormigón, pudiendo resultar perjudicial para elementos de hormigón armado expuestos a la acción del CO<sub>2</sub> en presencia de humedad, debido al riesgo de corrosión por despasivación de la armadura asociado al proceso de carbonatación (Possan, 2010; Possan et al., 2018). Alexander & Beushausen (2019) señalan que, en la literatura, se observa un creciente interés por la modelización de la carbonatación, particularmente vinculado al uso cada vez mayor de materiales cimenticios suplementarios (MCS). Los autores destacan que los modelos desarrollados deben considerar tanto la química del sistema (material carbonatable) como la reactividad del MCS, teniendo en cuenta la relación entre la resistencia física y química a la penetración de CO<sub>2</sub> en el hormigón, y aplicando un razonamiento análogo en el caso de los cloruros (Alexander & Beushausen, 2019).

En cuanto a la variación del contenido de MCS, Simoneto (2024) llevó a cabo un estudio *in situ* para evaluar los aspectos asociados a hormigones convencionales producidos en obra, empleando cementos con diferentes contenidos de clínker. Los hormigones fueron elaborados por los operarios, con cinco amasadas por tipo de cemento, sin intervención del investigador. Los resultados obtenidos (tabla 1) indican que el cemento con mayor contenido de clínker (CP V ARI) presentó mejores indicadores de ecoeficiencia y durabilidad que el cemento de menor emisión de carbono (CP II-Z). Para la estimación de la VUP (vida útil de proyecto), correspondiente al período de iniciación de la corrosión, en las simulaciones de difusión de cloruros y de CO<sub>2</sub> (carbonatación), se emplearon los modelos de Andrade et al. (2017) y de (Possan et al., 2018), respectivamente, considerando el hormigón sin revestimiento. En las simulaciones, el ambiente de exposición considerado fue el exterior protegido de la lluvia, con una concentración de CO<sub>2</sub> de 422 ppm, una humedad relativa del 73 % y una temperatura de 25 °C. El IvUP (índice de vida útil de proyecto), expresado en kg de cemento/año, se calculó como el consumo de cemento para la producción de 1 m<sup>3</sup> de hormigón dividido por la VUP simulada, basada en la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días (ecuación 1). Cuanto más bajo sea este indicador, mejor.

$$I_{VUP} = \frac{kg.cemento/m^3}{VUP} \quad (1)$$

El índice de aglutinante (IL) y el índice de carbono (IC) se calcularon de acuerdo con la literatura (Damineli et al., 2010; Oliveira et al., 2023), considerando también que cuanto menor, mejor.

De acuerdo con la tabla 1, en las condiciones de producción de estos hormigones, elaborados en obra, sin orientación técnica ni control de materiales y procesos, se obtienen indicadores técnicos,

ambientales y de sostenibilidad menos favorables para el cemento de menor grado de clinkerización, lo que indica que, para que el proceso de descarbonización sea realmente efectivo, es necesario actuar sobre toda la cadena del material, evitando pérdidas de desempeño en la aplicación. De lo contrario, se corre el riesgo de simplemente trasladar el carbono de un punto a otro, es decir, del cemento al hormigón. Adesina e Zhang (2024) subrayan que reducir únicamente el carbono incorporado de los materiales constituyentes resulta insuficiente para garantizar un hormigón verdaderamente sostenible, siendo necesario analizar también las implicaciones del uso de materiales de bajo carbono que sustituyen a los componentes convencionales de la mezcla. Los autores señalan que es imprescindible emplear materiales con menor impacto ambiental, además de producir hormigones más durables, con el fin de asegurar el desempeño a largo plazo (Adesina y Zhang, 2024). En el caso analizado (tabla 1), los indicadores IL, IC e Ivup resultaron ligeramente inferiores, lo cual es deseable, para los hormigones producidos con cemento CP V ARI, a pesar de que este presenta una mayor huella de carbono por tonelada en comparación con el cemento CP II-Z (Possan, 2019). Este comportamiento se explica porque, en la aplicación práctica, los hormigones elaborados con CP V ARI alcanzaron valores de resistencia a la compresión un 22 % superiores, lo que impacta directamente en los indicadores ambientales y de durabilidad evaluados.

Tabla 1. Indicadores técnico-ambientales y de durabilidad de hormigones convencionales elaborados en obra, utilizando diferentes tipos de cemento, extraídos del estudio de Simoneto (2024).

Indicadores	Cemento Portland (ABNT, 2018)	
	CP V ARI	CP II Z 32
Fc (MPa)	25,0	19,3
Consumo de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	305,0	298,0
IL (kg.Cemento/MPa)	12,4	13,4
IC (kg.CO <sub>2</sub> /MPa)	11,1	12,5
Difusión de CO <sub>2</sub> (Possan, et al., 2018)	Ec (mm)	17,7
	VUP (anos)*	99,5
	Ivup (kg.Cemento/año)	3,1
Difusión de Cl (Andrade et al., 2017)	Cl (mm)	60,58
	VUP (anos)**	21,5
	Ivup (kg.Cemento/año)	14,2

Recubrimiento adoptado en las simulaciones: \* 25 mm \*\*40 mm. Fc = resistencia a compresión del hormigón a los 28 días. IL=índice de ligante. IC=índice de carbono. Ec = profundidad de carbonatación para 50 años de VUP. Cl = penetración de cloruros para 50 años de VUP. VUP = vida útil de proyecto. Ivup = Índice de vida útil.

La resistencia a la compresión es un indicador crítico de la capacidad del hormigón para soportar daños de origen ambiental (Félix et al., 2023). Dado que esta propiedad está asociada a la porosidad, cuanto menor es la resistencia, mayor es la porosidad, se facilita la penetración de agentes agresivos y se reduce la VUP, lo cual resulta indeseable desde el punto de vista de la durabilidad y la sostenibilidad de las construcciones.

Es sabido que la durabilidad de los materiales a base de cemento no constituye una propiedad intrínseca, sino que depende de su interacción con el ambiente de exposición (Scrivener, et al, 2018). El diseño de la durabilidad implica la selección de una combinación adecuada de materiales y detalles estructurales con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de la estructura a lo largo del tiempo (Alexander & Beushausen, 2019). Los estudios de durabilidad son fundamentales para el análisis de la vida útil de las estructuras de hormigón, la cual presenta un carácter holístico (Castro-Borges & Helene, 2013; de Brito & Kurda, 2021) y debe evaluarse por etapas temporales, en las que ocurren fenómenos específicos y particulares (Castro-Borges & Helene, 2013). No obstante, los estudios de durabilidad conllevan costes elevados y requieren largos períodos de análisis, lo que dificulta su desarrollo (Pauletti, 2004). En síntesis, el diseño de

la durabilidad exige un enfoque intrínsecamente holístico, capaz de integrar las modificaciones fisicoquímicas del CP, los fenómenos dependientes del tiempo y las exigencias de desempeño a lo largo de la vida útil, so pena de que soluciones de bajo carbono generen beneficios aparentes, pero deriven en estructuras menos durables y en mayores demandas de rehabilitación en el futuro.

En resumen, se observa que la necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción de cemento, alcanzada principalmente mediante la reducción del contenido de clínker, ha afectado las características fisicoquímicas del material, lo que ha generado nuevos desafíos, especialmente en el cumplimiento de los criterios de durabilidad de las construcciones. Dada la velocidad de estos cambios, los estudios de durabilidad no han logrado seguir el ritmo de las transformaciones. Además, como la durabilidad de los materiales a base de cemento Portland ordinario (OPC) viene siendo estudiada desde el siglo pasado, las investigaciones en este ámbito suelen no considerarse innovadoras y difícilmente son aceptadas para publicación, lo que desincentiva la realización de estudios en este campo y genera lagunas de conocimiento sobre los efectos de la descarbonización del cemento en la durabilidad del hormigón.

#### 4. DE LA RESISTENCIA A LA DESCARBONIZACIÓN

Desde el advenimiento del cemento Portland, se contabilizan aproximadamente 200 años de historia, en un período que, como se muestra en las figuras 1 y 2, coincide con los grandes avances de la humanidad y el incremento de las emisiones de GEI. A lo largo de este recorrido, se han producido numerosos cambios, como se ilustra en la figura 7, actualizada a partir de Possan (2010) para incorporar las problemáticas actuales. En esta representación se observa que, en las etapas iniciales del desarrollo y la difusión del hormigón armado, los elementos y estructuras se concebían y proyectaban fundamentalmente con base en el sentido común y la experiencia profesional. La principal característica controlada era la resistencia a compresión, considerada durante mucho tiempo un parámetro fiable para las especificaciones de proyecto. En aquella época, los valores de resistencia a la compresión se situaban entre 10 y 20 MPa, con estructuras y elementos de elevada robustez. Se creía que el hormigón, producido a partir del cemento Portland recientemente descubierto por John Aspdin en 1824, se comportaba como una roca, con una durabilidad superior al ciclo de vida humano.

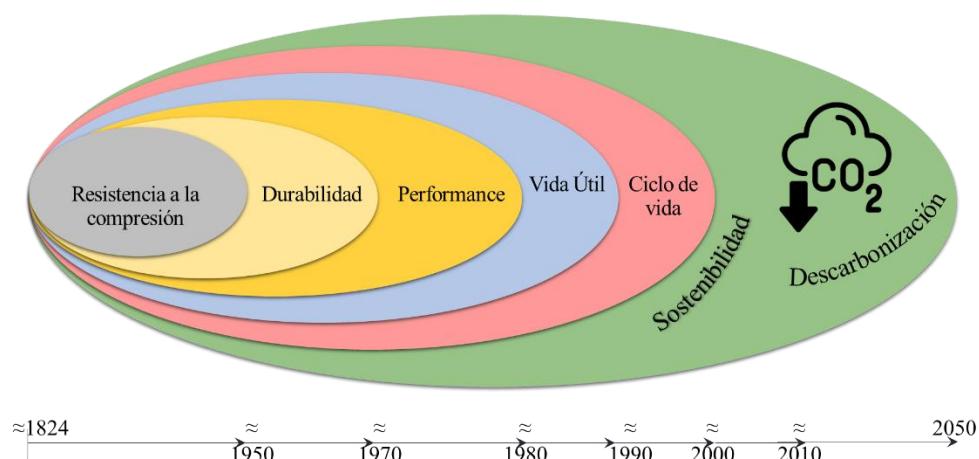


Figura 7. Evolución conceptual del hormigón a lo largo del tiempo (actualización de la figura propuesta en la tesis doctoral de Possan, 2010; Possan et al., 2018).

Sin embargo, con el paso del tiempo y el registro de las primeras incidencias asociadas a un comportamiento no esperado del material, se iniciaron los estudios de durabilidad, considerando el ambiente de exposición y el comportamiento en servicio, y emergió el concepto de desempeño.

Hacia la década de 1950, la durabilidad pasó a entenderse como la interacción entre el material y el ambiente de exposición, constatándose que agentes agresivos externos, como los iones cloruro y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), pueden degradar los materiales fabricados con CP. Paralelamente, comenzó a ser necesario definir el “tiempo” durante el cual el hormigón sería capaz de cumplir los requisitos de proyecto, considerando tanto el uso (desempeño) como las acciones del ambiente de exposición (durabilidad), lo que condujo, a finales del siglo XX, al desarrollo de estudios de vida útil determinística y probabilística. Asimismo, en la transición hacia el siglo XXI, factores como la competitividad y la preservación ambiental han impulsado cambios en la concepción de las estructuras, exigiendo que estas se diseñen desde un enfoque holístico, que tenga en cuenta el ciclo de vida de las construcciones.

Inicialmente, el análisis del ciclo de vida se centraba en los aspectos “del cuna a la tumba”; sin embargo, con el avance de la economía circular (EC), esta perspectiva evolucionó hacia el enfoque “de la cuna a la cuna”, orientado al reaprovechamiento continuo de recursos y materiales. En este contexto de evolución conceptual, el concepto de sostenibilidad de las estructuras de hormigón comenzó a ser debatido por numerosos investigadores y organizaciones a nivel mundial, dando lugar a los primeros documentos de referencia, de carácter mayoritariamente teórico, entre los que destacan fib 53 (2010) y Fib 2020 (2024). Solo en los últimos diez años el concepto de descarbonización ha recolectado mayor relevancia en el sector, especialmente en la industria del cemento, consolidándose como un indicador cuantificable del avance hacia la sostenibilidad. Descarbonizar implica reducir la huella de carbono y de energía de los productos y procesos, mediante un proceso lento y progresivo, que puede verse impulsado por nuevas tecnologías y resulta fundamental para la contención del calentamiento global en curso.

De manera general, el consenso actual es que un hormigón sostenible es un hormigón duradero (fib, 2024; Martinez et al., 2025; Possan et al., 2018). Estudios recientes (Gursel et al., 2023; Martinez et al., 2025) demuestran que estructuras con mayor longevidad, ya sea por la durabilidad de los materiales empleados (Martinez et al., 2025) o por mecanismos de reutilización de estructuras existentes en el entorno construido para nuevas aplicaciones (Gursel et al., 2023), resultan más sostenibles, es decir, presentan un menor potencial de calentamiento global. Un hormigón más duradero puede reducir significativamente las emisiones de  $\text{CO}_2$  asociadas al cemento. El hormigón romano, debido a su extraordinaria durabilidad, ofrece aportaciones relevantes para el hormigón moderno con vistas a la construcción de bajo carbono, como el uso de biomasa como fuente de combustible (Martinez et al., 2025). Al mismo tiempo que se reducen las emisiones de carbono, tecnologías emergentes como la mineralización de  $\text{CO}_2$  (Proença et al., 2024), los materiales de base biológica y la impresión 3D prometen transformar los métodos constructivos (Kumar et al., 2025). Las innovaciones en materiales (Proença et al., 2024), los métodos avanzados de dosificación de materiales cimenticios (Oliveira et al., 2025), el uso de tecnologías digitales como la inteligencia artificial (IA) (Felix et al., 2021) y la internet de las cosas (IoT) (Barbhuiya et al., 2025), así como las tecnologías de captura y uso del carbono (Aceituno et al., 2025; Emanuelsson et al., 2025; Yan & Zhang, 2019), son elementos clave para la producción de hormigón de bajo carbono (Barbhuiya et al., 2025). Asimismo, las soluciones basadas en la biomimética, como el empleo de agentes biológicos para la autorreparación de fisuras en estructuras de hormigón (De Rooij et al., 2013; Ghellere et al., 2025; Jonkers & Schlangen, 2007; S. Kumar et al., 2025; Lenz et al., 2023), presentan un alto potencial de aplicación para la fabricación de estructuras resilientes y durables.

## 5. PERSPECTIVAS FUTURAS

La descarbonización de la industria cementera representa una transición inevitable y estratégica para alcanzar los objetivos globales de neutralidad de carbono a 2050. No obstante, este proceso exige que el sector evolucione de una lógica centrada exclusivamente en la reducción directa de

emisiones a un enfoque integrado que contemple también los impactos en el desempeño y la durabilidad de las estructuras de hormigón.

Entre las principales tendencias observadas, destaca la sustitución del clínker por materiales cimenticios suplementarios (MCS), como escorias, cenizas volantes, fíler calizo y arcillas calcinadas. Si bien estas sustituciones contribuyen a mitigar las emisiones, plantean desafíos técnicos relacionados con el mantenimiento de la reactividad y la garantía de la vida útil de las estructuras, lo que requiere un control riguroso de la dosificación, el curado y la compatibilidad entre los constituyentes.

Otra tendencia consolidada es el incremento de la finura y de la reactividad de los cementos, una estrategia orientada a compensar la reducción del contenido de clínker, pero que puede aumentar el calor de hidratación y favorecer el desarrollo de manifestaciones patológicas, como la formación retardada de etringita (DEF) y la fisuración térmica a edades tempranas.

En el horizonte tecnológico, se prevé el avance de las soluciones de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), consideradas fundamentales para alcanzar emisiones netas cero a partir de 2030. En Brasil, políticas recientes, como la Ley nº 15.042/2024, señalan la incorporación del país a este mercado emergente, aún en proceso de consolidación a nivel internacional.

Perspectivas recientes también apuntan a la integración entre la descarbonización y la durabilidad como un eje estratégico. La literatura enfatiza que, sin considerar el desempeño a largo plazo, el sector corre el riesgo de trasladar el problema del cemento al hormigón, lo que da lugar a emisiones indirectas asociadas a mantenimientos frecuentes o reconstrucciones prematuras. En este sentido, resulta imperativo incorporar criterios de durabilidad en los planes de mitigación del carbono, con el fin de asegurar beneficios ambientales reales y sostenidos de las soluciones de bajo carbono.

Adicionalmente, se observa el avance de tecnologías emergentes, como la mineralización de CO<sub>2</sub>, los materiales de base biológica, los cementos con agentes autorregenerativos y la impresión 3D de hormigón, que prometen redefinir las prácticas constructivas y los paradigmas de sostenibilidad. En paralelo, la adopción de principios de economía circular y la extensión de la vida útil de las estructuras existentes constituyen pilares fundamentales de la transición hacia un entorno construido más resiliente y de menor impacto ambiental.

Dado que el cemento Portland es la principal materia prima en la cadena de materiales a base de cemento, sus características fisicoquímicas afectan a todos los actores involucrados, lo que exige un enfoque holístico que considere conjuntamente los procesos de producción del cemento y del hormigón. Sin embargo, debido a que los estudios de durabilidad son complejos y requieren largos períodos de análisis, se identifica una laguna en la literatura sobre el comportamiento de durabilidad de los hormigones producidos con cementos convencionales descarbonizados.

Cabe destacar que, a lo largo de las últimas décadas, los bienes de consumo han experimentado modificaciones para responder a exigencias técnicas y económicas y, más recientemente, a exigencias ambientales. Este es el caso del cemento Portland, cuyo cemento producido en 2025 es ligeramente distinto del fabricado a comienzos del siglo XXI y del del siglo anterior. Que el material sea diferente no constituye, en sí mismo, un problema; la cuestión central radica en cómo emplearlo de modo que se mantenga el desempeño del hormigón a lo largo del tiempo.

En síntesis, resulta necesario hacer más con menos y avanzar desde la idea de “el mejor cemento y hormigón del mundo al mejor cemento y hormigón para el mundo”. La notable durabilidad del hormigón romano puede servir de fuente de inspiración en este camino.

## 6. CONCLUSIONES

La descarbonización del cemento Portland constituye un camino necesario para cumplir los objetivos globales de mitigación climática; sin embargo, sus repercusiones en la durabilidad de las estructuras de hormigón no pueden ignorarse. Las modificaciones fisicoquímicas derivadas de la

reducción del contenido de clínker y del uso ampliado de materiales cimenticios suplementarios (MCS) alteran el comportamiento del cemento e imponen nuevos desafíos de desempeño a lo largo de la vida útil. En este contexto, la sostenibilidad depende de un enfoque holístico que integre la producción, la composición, el comportamiento mecánico y la durabilidad, y evite soluciones de bajo carbono que comprometan el desempeño en servicio. Avanzar hacia este equilibrio exige investigación continua, métodos de evaluación más robustos y proyectos que concilien la responsabilidad ambiental con la longevidad estructural.

## 7. GRADECIMIENTOS

La autora agradece a los estudiantes de grado, máster y doctorado, así como a los investigadores del grupo de investigación *CO<sub>2</sub> Construction*, que trabajan en el ámbito de la descarbonización y/o la durabilidad, y que, mediante discusiones, análisis críticos e intercambio de experiencias, hicieron posible la elaboración de este texto. Asimismo, agradece a Kathleen Risson y a Emerson Félix por su contribución a la revisión del manuscrito.

## 8. REFERENCIAS

- Climateworks (2025). *Achieving a sustainable U.S. infrastructure bill: New pathways to decarbonizing cement and concrete* - ClimateWorks Foundation. Available in <https://www.climateworks.org/>. Acesso 05 setembro 2025.
- FIB Bulletin 53 (2010). *Model Code for Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance*, Second edition. Volume 3: Design of durable concrete structures. 2010, p.390.
- Bentz, D. P., Sant, G., Weiss, J. (2008). *Early-Age Properties of Cement-Based Materials: I. Influence of Cement Fineness*. Journal of Materials in Civil Engineering, [s. l.], v. 1561, n. 2, p. 17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20).
- ABNT. (2018). *NBR 16697: Portland cement - Requirements* (p. 12).
- Aceituno, D., Zhang, X., Hao, H. (2025). *A comprehensive review on carbon utilization pathways in concrete from conventional to improved strategies*. Carbon Capture Science & Technology, 16, 100467. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2025.100467>
- Adesina, A. (2020). *Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions*. Environmental Challenges, 1. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>
- Adesina, A., Zhang, J. (2024). *Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency*. Next Sustainability, 3 (December 2023), 100025. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100025>
- Alexander, M., Beushausen, H. (2019). *Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique*. Cement and Concrete Research, 122, 17–29. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.04.018>
- Andrade, J. J. O., Possan, E., Dal Molin, D. C. C. (2017). *Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2. <https://doi.org/10.1007/S41024-017-0025-X>
- Barbhuiya, S., Das, B. B., Adak, D., Kapoor, K., Tabish, M. (2025). *Low carbon concrete: advancements, challenges and future directions in sustainable construction*. Discover Concrete and Cement, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00002-y>
- Brasil. (2024). *Lei 15.042 - Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)*. 1, 1–2.
- Castro-Borges, P., Helene, P. (2013). *A holistic conceptual approach to concrete service life: a split into different time- stages*. Revista Alconpat, 3(3), 228–287. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.324>
- Choi, Y. W., Khalifa, M., Eltahir, E. A. B. (2024). *Climate Change Impact on “Outdoor Days”*

- Over the United States. *Geophysical Research Letters*, 51(19), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2024GL111607>
- Coffetti, D., Crotti, E., Gazzaniga, G., Carrara, M., Pastore, T., Coppola, L. (2022). *Pathways towards sustainable concrete*. *Cement and Concrete Research*, 154, 106718. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106718>
- Damineli, B. L., Kemeid, F. M., Aguiar, P. S., John, V. M. (2010). *Measuring the eco-efficiency of cement use*. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>
- Dattani, S., Rodés-Guirao, L., Ritchie, H., Ortiz-Ospina, E., Roser, M. (2025). *Life Expectancy*. 2023. <https://ourworldindata.org/life-expectancy>
- de Brito, J., Kurda, R. (2021). *The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials*. *Journal of Cleaner Production*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>
- De Rooij, M., Van Tittelboom, K., Belie, N. de, Schlangen, E. (2013). *RILEM TC 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*. In Springer (Vol. 1).
- Emanuelsson, A. H., Rootzén, J., Johnsson, F. (2025). *Deployment of carbon capture and storage in the cement industry – Is the European Union up to shape?*. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 146, 104442. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2025.104442>
- Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E. (2021). *Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: Development and parametric analysis*. *Construction and Building Materials*, 266, 121050. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121050>
- Félix, E. F., Falcão, I. da S., dos Santos, L. G., Carrazedo, R., Possan, E. (2023). *A Monte Carlo-Based Approach to Assess the Reinforcement Depassivation Probability of RC Structures: Simulation and Analysis*. *Buildings*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040993>
- fib. (2024). *Model Code for Structural Concrete* (2020). In International Federation for Structural Concrete (fib). fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete (fib).
- Funahashi Jr, E. I., Possan, E., Hasparyk, N. P. (2024). *Influência do calor de hidratação de cimentos com escória de alto forno no risco de formação da etringita tardia (DEF)*. Ibracon, 1, 1–16.
- Ghellere, P., Lenz, S. K., Passarini, M. R. Z., Possan, E. (2025). *Evaluation of different biological agents and application methods on the cracks self-healing in cement-based matrices*. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10(2). <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00594-9>
- Goulart, R. G. (2023). *Ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de construção e demolição* (Vol. 1) [Dissertation]. Universidade Federal da Integração Latino-Americana.
- Gursel, A. P., Shehabi, A., Horvath, A. (2023). What are the energy and greenhouse gas benefits of repurposing non-residential buildings into apartments? *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107143. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.107143>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K. L. (2020). *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries*. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(11), 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Habert, G., Roussel, N. (2009). *Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives*. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 397–402. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.04.001>
- Hansen, J. E., Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L. S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J. C., von Schuckmann, K., Loeb, N. G., Osman, M. B., Jin, Q., Tselioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J., Li, J. (2023). *Global warming in the pipeline*. *Oxford Open Climate Change*, 3(1). <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>

- Harari, Y. N. (2020). *Sapiens: a brief history of Humankind*. Companhia das Letras.
- Harari, Y. N. (2024). *Nexus: a brief history of information networks from the stone age to AI* (Dom, Ed.). Random House.
- Haspryk, N. P., Kuperman, S. C., Funahashi Jr, E. I., Vicente, G. R., Gambale, E. de A. (2023). *Recomendações Técnicas para a prevenção da DEF e da fússuração térmica no concreto*. In Educacao e Sociedade (Vol. 1, Issue 1). [http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/Educacao\\_PereiraAS\\_1.pdf](http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/Educacao_PereiraAS_1.pdf) [http://www.anpocs.org.br/portal/publicacoes/rbcs\\_00\\_11/rbcs11\\_01.htm](http://www.anpocs.org.br/portal/publicacoes/rbcs_00_11/rbcs11_01.htm) [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7845/1/td\\_2306.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7845/1/td_2306.pdf) [https://direitoufma2010.files.wordpress.com/2010/IEA/CSI.\(2009\).Cement+Technology+Roadmap+Carbon+Emissions+Reductions+up+to+2050.pdf](https://direitoufma2010.files.wordpress.com/2010/IEA/CSI.(2009).Cement+Technology+Roadmap+Carbon+Emissions+Reductions+up+to+2050.pdf)
- IEA/CSI. (2009). *Cement Technology Roadmap: Carbon Emissions Reductions up to 2050*.
- IPPC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (1992). *Climate change: The IPCC 1990 and 1992 assessments*. In The World Environment 1972–1992. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-2280-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2280-1_3)
- Jonkers, H. M., Schlangen, E. (2007). *Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach*. Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 3, 1821–1826.
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., Bernal, S. A. (2019). *Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights*. Cement and Concrete Research, 122(February 2019), 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Koutroulis, A. G. (2019). *Dryland changes under different levels of global warming*. Science of the Total Environment, 655, 482–511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.215>
- Kumar, R. (2020). *Dynamic Dalmia: Can They Do it Again?*. 1–10. <https://doi.org/10.1177/2516604220928787>
- Kumar, S., Gangotra, A., Barnard, M. (2025). *Towards a Net Zero Cement: Strategic Policies and Systems Thinking for a Low-Carbon Future*. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40518-025-00253-0>
- Lenz, S. K., Possan, E., Passarini, M. R. Z., Ghellere, P. (2023). *Influence of different bacterial strains on cracks self - healing in cement - based matrices with and without incorporated air*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 3. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00312-3>
- Martinez, D. M., Miller, S. A., Monteiro, P. J. M. (2025). *How sustainable was ancient Roman concrete?* IScience, 28(8), 113052. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2025.113052>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- NASA. (n.d.). *Carbon Dioxide*. 2025. Retrieved August 25, 2025, from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>
- Nehdi, M. L., Marani, A., Zhang, L. (2024). *Is net-zero feasible: Systematic review of cement and concrete decarbonization technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 191, 114169. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.114169>
- NOAA, N. O. and A. A. (2025). *Global Monitoring Laboratory*.
- NOAA/ESRL, 2022. (2025). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. *Earth System Research Laboratories. Global Monitoring Laboratory*. In Earth System Research Laboratories. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- OECD. (2024). *How's Life? 2024: Well-being and Resilience in Times of Crisis*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/90ba854a-en>
- Oliveira, D. R. B., Leite, G., Possan, E., Marques Filho, J. (2023). *Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production*. Construction and Building Materials, 397(July), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132382>
- Oliveira, D. R. B., Proença, M. P., Risson, K. D. B. de S., Neves Junior, A., Marques Filho, J., Possan, E. (2025). *Optimized cementitious matrices with activated CDW fines: A sustainable path to low carbon cement*. Construction and Building Materials, 483, 141719.

<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.141719>

Olivier, J. G. J., Paters, J. A. H. W. (2020). *Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas 2020 report* (Issue December). <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2020-report>

Olsson, J. A., Miller, S. A., Alexander, M. G. (2023). *Near-term pathways for decarbonizing global concrete production*. Nature Communications, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40302-0>

Pauletti, C. (2004). *Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação*.

Population Matters. (2025). *population matters*. 2025. <https://populationmatters.org/>

Possan, E. (2010). *Modelagem da Carbonatação e Previsão de Vida Útil de Estruturas de Concreto em Ambiente Urbano* [Tesis]. UFRGS.

Possan, E. (2019). *Captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios*. 72–78.

Possan, E., Dal Molin, D. C. C., Andrade, J. J. O. (2018). *A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0031-7>

Proença, M. P., Oliveira, D. R. B., de Souza Risson, K. D. B., Possan, E. (2024). *CDW Powder Activated by Mechanical, Thermal and Tannic Acid Treatment: An Option for Circularity in Construction*. Waste and Biomass Valorization, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02802-y>

Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W. R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., Cresko, J., Miller, S. A., Roy, J., Fennell, P., Cremmins, B., Koch Blank, T., Hone, D., Williams, E. D., de la Rue du Can, S., ... Helseth, J. (2020). *Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070*. Applied Energy, 266, 114848. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114848>

Ritchie, H., & Roser, M. (2025). *CO<sub>2</sub> emissions*. 2020. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

ROADMAP BRASIL. (2019a). *Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. SNIC 2019.

ROADMAP BRASIL. (2019b). *Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. SNIC 2019.

Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry*. Cement and Concrete Research, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

Shah, I. H., Miller, S. A., Jiang, D., Myers, R. J. (2022). *Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO<sub>2</sub> emissions by up to 1.3 gigatons*. Nature Communications, 13(1). <https://doi.org/10.1038/S41467-022-33289-7>

Simoneto, G. W. (2024). *Diagnóstico temporal das alterações físico-química do cimento Portland brasileiro e do uso de cimento ensacado para produção de concreto in situ* (Vol. 4, Issue 1) [Dissertation]. Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

Suleyman, M., Bhaskar, M. (2023). *A próxima onda*. In RECORD (Vol. 1, Issue 1).

United Nations. (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. In Department of Economic and Social Affairs, Population Division (Vol. 11, Issue 1).

WBCSD. (2018a). *Technology roadmap for cement - World Business Council for Sustainable Development*. In International Energy Agency. <https://www.wbcsd.org/resources/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry/>

WBCSD. (2018b). *World Business Council for Sustainable Development. Technology roadmap for cement*. In International Energy Agency.

Yan, J., Zhang, Z. (2019). *Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)*. Applied Energy, 235, 1289–1299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.019>