



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Hacia una arquitectura sostenible: repensando
el hormigón

Towards sustainable architecture: rethinking
concrete

Autora

Elena Pequerul Ezquerra

Directora

Marta Monzón Chavarrías

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2024

HACIA UNA ARQUITECTURA SOSTENIBLE: REPENSANDO EL HORMIGÓN

Grado de Estudios en Arquitectura EINA
Elena Pequerul Ezquerro



RESUMEN:

Este trabajo aborda la arquitectura sostenible desde una perspectiva integral, reconociendo la importancia de no limitarse a versiones futuras, sino también de explorar el presente y el pasado de determinados materiales y técnicas constructivas. Al mismo tiempo, también es fundamental aplicar a estas técnicas una visión desde la Economía Circular como herramienta clave para evaluar y promover la sostenibilidad de la arquitectura.

Por eso en este trabajo se busca repensar el hormigón tal y como lo conocemos ahora, mostrando sus dos facetas: su versión tradicional, reconocida por su accesibilidad y funcionalidad, y su potencial capacidad para reinventarse en busca de una arquitectura más sostenible. El estudio se enfoca en dos formas específicas de transformar el hormigón convencional, evaluando su viabilidad y demostrando cómo pueden ser implementadas en la arquitectura contemporánea con resultados extraordinarios.

Palabras clave: arquitectura sostenible, hormigón, impacto ambiental, circularidad, investigación.

ABSTRACT:

This essay approaches sustainable architecture from a holistic perspective, recognizing the importance of not only focusing on future versions, but also of exploring the present and the past of certain materials and construction techniques. At the same time, it is essential to apply a Circular Economy approach as a key tool to these techniques to evaluate and promote the architectural sustainability.

Therefore, this essay seeks to rethink concrete as we currently know it, showing its two facets: the traditional version, renowned for its accessibility and functionality, and the potential to reinvent itself in pursuit of a more sustainable architecture. The study focuses on two specific ways of transforming conventional concrete, evaluating their viability and proving how they can be implemented in contemporary architecture with extraordinary results.

Keywords: sustainable architecture, concrete, environmental impact, circularity, research.

1. Introducción

- 1.1. Motivación y objetivos
- 1.2. Metodología y fuentes
- 1.3. Estructura de trabajo

2. Sostenibilidad ambiental

- 2.1. Concepto de sostenibilidad
- 2.2. Impacto ambiental del sector de la edificación
- 2.3. Análisis de ciclo de vida
- 2.4. El papel de los materiales en el desarrollo sostenible

3. Hormigón convencional

- 3.1. Contexto
- 3.2. Marco normativo
- 3.3. Composición y obtención de materias
- 3.4. Propiedades
- 3.5. Problemática ambiental

4. Hormigón ciclópeo

- 4.1. Contexto
- 4.2. Marco normativo y aplicaciones
- 4.3. Composición y obtención de materias
- 4.4. Proceso de ejecución
- 4.5. Propiedades
- 4.6. Evaluación del Ciclo de Vida comparando hormigón ciclópeo y hormigón convencional.
- 4.7. Caso de estudio: Casa 1413, Harquitectes

5. Hormigón reciclado

- 5.1. Contexto
- 5.2. Marco normativo y aplicaciones
- 5.3. Composición y obtención de materias
- 5.4. Propiedades
- 5.5. Combinación de ACV e Índice de Circularidad para la evaluación del impacto ambiental del hormigón reciclado
- 5.6. Caso de Estudio: Cloister House, MORQ

6. Nuevas líneas de investigación

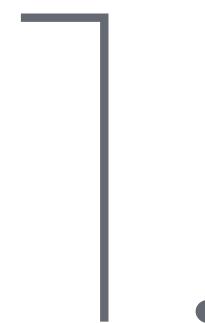
- 6.1. Bio-hormigón
- 6.2. Grafeno como aditivo

7. Conclusión

8. Biografía

Anexos

INTRODUCCIÓN



1.1. Motivación y objetivos

Desde el inicio de mi trayectoria académica, he sentido una inquietud personal por la sostenibilidad en la arquitectura y la construcción. Esta preocupación no solo nació a raíz del crecimiento de mis conocimientos en arquitectura, si no que antes de iniciar el grado, ya me sentía atraída por explorar la arquitectura sostenible y las formas en las que podría contribuir al bienestar del planeta. Además de este interés progresivo, observar los efectos devastadores que ha provocado la falta de consideración en el medio ambiente, como inundaciones, cambios en los ecosistemas, aumento de la temperatura media global o el incremento del nivel del mar, ha reforzado mi convicción en la necesidad de abordar el desafío de promover un enfoque más amable con el planeta, en este caso, a través del sector de la construcción. Si bien es cierto que no podemos revertir estos daños ya causados al planeta, si podemos establecer metas para un futuro más esperanzador para las generaciones venideras.

Inicialmente, en el momento de elegir el tema del presente trabajo, la premisa inicial era enfocar la arquitectura desde un cambio hacia la sostenibilidad, sin embargo no estaba claro en qué ámbito en específico. Tras una investigación más profunda, comencé a conocer la diversidad de alternativas y enfoques novedosos y muy interesantes que el hormigón puede ofrecer en términos de sostenibilidad. Además, la inquietud en investigar estas técnicas se incrementa al pensar que quizás en un futuro puedan ser aplicadas personalmente a un ámbito laboral.

El presente trabajo cobra relevancia en este campo ya que se enfoca en la etapa de extracción y fabricación de materiales, y la importancia de que estos sean reutilizados, obteniendo una visión del edificio desde la Economía Circular. Hasta ahora, las regulaciones y normativas se centraban principalmente en la fase de uso de los edificios. Sin embargo, algunas organizaciones ya están adaptando una perspectiva con vistas al futuro que abarca desde el inicio del proceso constructivo para reducir las emisiones de CO₂ hasta el consumo de materias primas en las fases iniciales de la edificación.

Esta investigación tiene como objetivo primordial explorar la capacidad de la arquitectura para adaptarse y responder a los requerimientos cambiantes de nuestra época y las futuras. Se pretende enfatizar la necesidad urgente de un cambio de paradigma en el sector de la construcción, ya que como se explicará posteriormente, afecta en gran medida a la situación actual del planeta. Además, se busca demostrar la viabilidad de dos alternativas más sostenibles al hormigón convencional, y cómo estas técnicas enriquecen la arquitectura.



Figura 1. Folleto de jornada técnica. Fuente: MAPEI.



Figura 2. Evento en Zaragoza. Fuente: GBCe.

1.2. Metodología y fuentes

El proceso de investigación se inicia con la búsqueda y recopilación de técnicas más sostenibles e innovadoras que el hormigón convencional, seleccionando las de más interés para su posterior desarrollo. Dado que se trata de un tema en desarrollo, gran parte de la información proviene de recursos online publicados por los propios fabricantes, y de artículos científicos de investigación.

Una vez verificada la base teórica del trabajo, el enfoque se dirige hacia la contextualización del concepto de sostenibilidad, en concreto enfocada a la construcción y el hormigón.

Asistir a eventos y jornadas técnicas informativas, como el evento organizado por MAPEI sobre descarbonización (Fig.1) y construcción sostenible, y las jornadas GBCe (Sostenibilidad XL Green Building Council España) en Zaragoza (Fig.2), proporcionó una importante oportunidad para obtener información actualizada y conocer las hojas de ruta establecidas por el sector cementero y GBCe.

Para el desarrollo de las técnicas constructivas seleccionadas, se recaba información de diferentes estudios científicos para respaldar la viabilidad y sostenibilidad de estas alternativas al hormigón convencional. Además, se buscan ejemplos construidos para ilustrar la aplicación práctica de estas técnicas. En la medida de lo posible, se consulta información proporcionada por los arquitectos y profesionales involucrados en estos proyectos.

En este estudio, ha sido esencial entender el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en relación con los materiales y técnicas seleccionadas. Dentro de las múltiples opciones disponibles, se ha optado por explorar dos soluciones o técnicas del hormigón que destacan por su sostenibilidad en las etapas de obtención de materias primas y fabricación.

Por último, el apartado dedicado a nuevas investigaciones se nutre principalmente de noticias científicas y estudios en desarrollo. Dado que estas investigaciones están en una fase temprana, la información es algo limitada, pero proporciona una visión de las posibles direcciones futuras.

1.3. Estructura de trabajo

A modo de introducción, se establece un contexto global abordando la situación actual de la sostenibilidad y el desarrollo, en concreto en el sector de la construcción. En este primer apartado es importante la consulta del marco normativo a nivel nacional y europeo, proporcionando una base sólida para identificar las áreas cruciales que requieren atención en pos de mejorar el desarrollo sostenible. Además, se justificará el motivo por el cual es crucial que esta investigación se enfoque en el hormigón en lugar de en otros materiales constructivos.

Una vez se haya establecido una panorámica completa de la situación actual, el siguiente paso es comprender en qué consiste el hormigón convencional. Esto abarcará desde su evolución a lo largo del tiempo, su composición y los problemas que han ido surgiendo debido a su excesivo uso hasta la fecha.

Con una comprensión sólida de los problemas y retos que las nuevas técnicas deben abordar para mejorar la sostenibilidad del hormigón, se procede a desarrollar la última fase del estudio. En esta fase, se llevará a cabo una investigación para identificar soluciones viables y su aplicabilidad práctica.

Finalmente, se expondrán algunas alternativas que podrían hacer del hormigón un material más sostenible en el futuro. Aunque estas técnicas aún se encuentran en una etapa de investigación, su inclusión en el trabajo muestra la capacidad del hormigón para evolucionar y mejorar en términos de sostenibilidad.

SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

2.

1987	Primera definición de sostenibilidad en el informe "Nuestro futuro en Común"
1992	Cumbre de la Tierra (Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo y Agenda 21)
1997	Carta de la Tierra
1997	Primera conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Protocolo Kyoto)
2002	Conferencia Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en Johannesburgo
2005	Entrada en vigor del protocolo Kyoto
2015	Se adoptan los objetivos de la agenda 2030

Figura 3. Línea temporal del desarrollo ambiental. Elaboración propia.

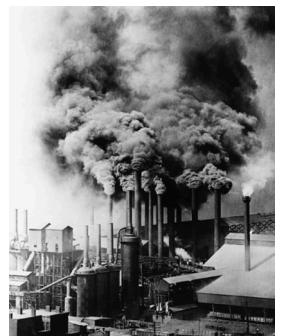


Figura 4. Chimeneas en Pittsburgh, Pensilvania, década de 1890 por Bettmann Corbis.

2.1. Concepto de sostenibilidad

La primera definición de desarrollo sostenible aceptada internacionalmente aparece en un documento conocido como "Nuestro Futuro en Común" en 1987¹, resultado del trabajo de la Comisión sobre Medio Ambiente y Desarrollo establecida por la Asamblea General de la ONU (Organización de las Naciones Unidas) dirigido por la primera ministra noruega G.H. Brundtland. Desde ese momento, la sostenibilidad y la preocupación por el medio ambiente comienza a cobrar cada vez más importancia (Fig.3).

La inclusión de este concepto se enmarcaría dentro de la Declaración de Río de Janeiro durante la celebración de la Cumbre de la Tierra en 1992², definiéndose como: "Aquel desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades." Esta definición y su inclusión en la sociedad se aplicará a numerosas disciplinas, y entre ellas también la arquitectura.

Hasta la segunda mitad del siglo XVIII la arquitectura era esencialmente biológica, adaptándose al entorno, a los recursos de proximidad y a la limitación de los materiales de construcción accesibles. Sin embargo a partir del año 1760, debido a la revolución industrial, se inició una transformación económica, social y tecnológica que afectó de lleno al sector de la construcción y provocó un crecimiento de consumo ilimitado a causa de las numerosas fuentes de generación energética (Fig.4). Estas nuevas fuentes de energía -el carbón, el petróleo y la energía nuclear- permitieron acceder a recursos minerales en cantidades sin precedentes.

A pesar de todos los cambios tecnológicos sucedidos hasta nuestro tiempo, actualmente el modelo de producción predominante, que caracteriza también a la arquitectura, ha sido heredado del modelo de producción de la revolución industrial, basándose en el consumo ilimitado de recursos, la generación incontrolable de residuos y la contaminación causada por el uso de combustibles fósiles, como el petróleo.

En el contexto de la edificación, tanto a nivel europeo como nacional, se han establecido directivas y políticas que buscan promover la sostenibilidad y la eficiencia energética en la construcción y uso de edificios. Estas directivas tienen como objetivo principal mitigar el impacto ambiental de los edificios, mejorar su rendimiento energético y contribuir activamente a la lucha contra el cambio climático.

Entre las directivas más destacadas que han sido implementadas, se encuentra la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (EPBD) a nivel europeo. Esta establece un marco regulatorio que busca impulsar la mejora de la eficiencia energética en los edificios. La EPBD exige que los Estados miembros adopten medidas específicas para fomentar la eficiencia energética en edificaciones nuevas y existentes, incluyendo la implementación de requisitos

mínimos de eficiencia y la instauración de sistemas de certificación energética. Entró en vigor por primera vez en 2002 (Directiva 2002/91/CE), revisándose en 2010 (Directiva 2010/31/UE) y 2018 (2018/844/UE). Estas revisiones³ introdujeron disposiciones adicionales para promover la renovación energética de edificios en la Unión Europea, estableciendo metas ambiciosas para la renovación de edificios con el objetivo de aumentar su eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Actualmente, se ha aprobado una nueva revisión de la EPBD, la Directiva (UE) 2024/1275, mediante la cual se amplía el alcance de la descarbonización estableciendo un límite de emisión de gases de efecto invernadero a lo largo de toda la vida útil del edificio y no solo a la fase de uso, entre otras iniciativas. De esta forma, se busca que las fases de construcción, mantenimiento, reforma y fin de vida sean más sostenibles.⁴

A nivel nacional, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)⁵ es una iniciativa estratégica que busca la transformación del sistema energético y la descarbonización de la economía. En este plan se contemplan medidas específicas para fomentar la eficiencia energética de la edificación, como la mejora de la envolvente térmica de los edificios y la promoción de construcciones con bajo consumo energético.

2.2. Impacto ambiental del sector de la edificación

El 28 de noviembre de 2019, el Parlamento Europeo emitió una declaración de estado de emergencia climática.

En este situación de emergencia climática, el sector de la construcción desempeña un papel esencial en el contexto de impactos ambientales, ya que globalmente supone:

- Un 36% del consumo de energía principalmente no renovable⁶
- Un 40% de las emisiones de CO₂ derivadas de la energía⁶
- Un 40% de las extracciones de materiales de la corteza terrestre⁷
- Entre un 30 y un 40% de los residuos generados⁸
- Un 16% del consumo de agua potable⁷

Dos de los grandes efectos de este impacto ambiental producido por la construcción, es el agotamiento de recursos no renovables y la generación incontrolada de residuos contaminantes⁹.

A nivel nacional en la Tabla 1 se cuantifica el impacto medioambiental de la construcción de viviendas mediante un cálculo aproximado de emisiones de CO₂, consumo de agua, materiales y producción de residuos. Tal y como se aprecia en la tabla, los valores actuales obtenidos exceden significativamente los valores óptimos⁹, llegando incluso a duplicarlos. A largo plazo, nuestro planeta no será capaz de soportar estos impactos.



Figura 5. Nueva Directiva EPBD 2024.



Figura 6. Plan Nacional Integrado de energía y Clima.

Valores actuales	Mejora	Valores óptimos
Emissions 3.059 kgCO ₂ /vivienda	-40%	1.875 kgCO ₂ /vivienda
Aqua 168 litros/persona/día	-50%	80 litros/persona/día
Materiales 2.792,8 kg/m ² , 9.070 M ³ /m ² y 850 kg/m ³	-7%	Existen proyectos de viviendas que se sitúan en 1.700 kg/m ² , 4.500 M ³ /m ² y 400 kg/m ³
Residuos 120 kg/m ³ obra nueva 320 kg/m ³ rehabilitación	-55%	10% de reducción y 50% de reciclaje

Tabla 1. Impacto ambiental de la construcción en España. Elaboración propia a partir de la cita 9.

3. Directiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética (2018). Diario Oficial de la Unión Europea. L 156/75

4. Parlamento Europeo (2024). Position of the European Parliament adopted at first reading on 12 March 2024 with a view to the adoption of Directive (EU) 2024/... of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast).

5. Gobierno de España (2020). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.

6. International Energy Agency & United Nations Environmental Program (2019). Global Status Report for Buildings and Construction.

7. Considerando datos aportados por CSIC.

8. Huedo, P. & López-mesa, B. (2013). Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles de edificación. Informes de la Construcción, vol. 65 (n529), 77-88.

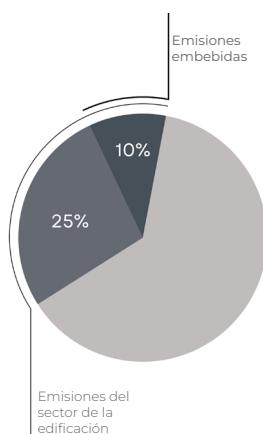
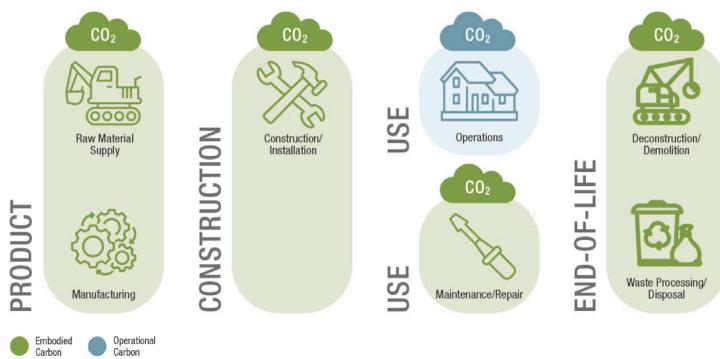
9. G. Wadel, J. Ayllaneda, A. Cuchí (2010). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. Informes de la Construcción, vol. 62 (n517), 37-51.

1. Asamblea General de las Naciones Unidas (1987). Informe "Nuestro Futuro en Común" (A/42/427).

2. Declaración de Río de Janeiro sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1992). Recuperado de <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>

Como respuesta a esta situación de urgencia, en los últimos años se han desarrollado recursos de gran utilidad destinados a comprender y mitigar el impacto ambiental derivado de la construcción. Entre estas herramientas se incluyen; programas de simulación que evalúan el comportamiento energético de los edificios, hojas de cálculo diseñadas para gestionar los residuos de construcción y demolición, bases de datos que albergan información ambiental sobre diversos materiales, manuales que promueven técnicas de construcción sostenible, y sistemas de evaluación y certificación ambiental, entre otras.

Sin embargo, a pesar de la contribución de estas herramientas para reducir la huella ecológica de los edificios, no garantizan la completa reducción de impactos ambientales, ya que se enfocan mayoritariamente en la fase de uso del edificio. Es decir, se está considerando únicamente el carbono operativo generado por el edificio.



10. Built4People (2020). People-centric sustainable built environment.

Como puede observarse en la figura 7, las emisiones de CO₂ vinculadas a la construcción también se generan durante el resto de fases del edificio, tales como la fabricación, el transporte, la construcción, la rehabilitación y el fin de vida. Las emisiones producidas en estas fases se conocen como carbono embebido. Para tener una perspectiva global del impacto de vida del edificio y sus emisiones totales, es crucial considerar tanto el carbono operativo relacionado con el uso del edificio como el carbono embebido acumulado en todas las etapas previas.

La iniciativa europea denominada “Built4People”¹⁰ indica que una parte significativa de las emisiones de carbono está vinculada al proceso de construcción y a las fases previas al uso del edificio. Esta cantidad representa alrededor de un tercio de las emisiones totales relacionadas con el sector de la construcción y contribuye alrededor del 10% al 12% de todas las emisiones globales de CO₂, tal y como se muestra en la figura 8.

2. 3. Análisis del ciclo de vida

El método que facilita evaluar exhaustivamente este impacto ambiental integral de los edificios es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), estandarizado por las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 y se define como la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto¹¹ a través de las distintas fases de su ciclo de vida.¹¹

Se consideran por entradas materias primas y energía, por salidas emisiones atmosféricas, aguas residuales, residuos sólidos, coproductos y otros vertidos, y por impactos ambientales el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, la acidificación, eutrofificación, etc.

La metodología general del ACV consta de cuatro fases fundamentales, aunque es posible llevar a cabo estudios simplificados que omitan alguna de ellas.¹²

FASE 1-Definición de objetivos y alcance: En esta fase inicial, se establecen los objetivos específicos del estudio y se determina el alcance del sistema que se va a analizar. Esto implica definir los límites del sistema, proporcionar los datos necesarios y plantear las hipótesis que guiarán el análisis.

En el caso de los edificios, las directrices establecidas por el Comité Técnico 350 del Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 350)¹¹ definen una estructura para el sistema que debe analizarse, abarcando 4 etapas o subsistemas del edificio: producción, construcción, uso y disposición final, tal como se refleja en la Tabla 2.

PRODUCCIÓN	CONSTRUCCIÓN	USO	DISPOSICIÓN FINAL
A1 Suministro de materias primas			
A2 Transporte			
A3 Manufactura			
	A4 Transporte	A5 Procesos on site de construcción	
		A6 Mantenimiento	
		B1 Uso	
		B2 Reparación	
		B3 Reemplazo	
		B4 Rehabilitación	
		B5 Consumo de energía operacional	
		B6 Consumo de agua operacional	
		B7 Desmantelamiento	
			C1 Demolición - demolición
			C2 Transporte
			C3 Tratamiento de residuos
			C4 Disposición final

Tabla 2. Etapas del ciclo de vida de un edificio según el estándar EN 15643-2 del CEN/TC 350. Elaboración propia.

FASE 2-Análisis de inventario: Durante esta etapa, se recopila y cuantifica toda la información relacionada con los flujos de energía y materiales que entran y salen del sistema a lo largo de su ciclo de vida.

FASE 3-Evaluación de los impactos ambientales: Una vez recopilada la información del inventario, se procede a evaluar cómo estos flujos de energía y materiales afectan al medio ambiente. Se analizan impactos como los que aparecen en la Tabla 3.

(1) Sistema de producto: todos los procedimientos o factores que permiten que la materia prima se convierta en un producto terminado listo para el consumo.

11. UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Principios y marco.

12. Enerbilca. (2012). Manual explicativo del Análisis de Ciclo de Vida aplicado al sector de la edificación. Barcelona.

Categoría de impacto
Calentamiento global
Destrucción de la capa de ozono estratosférico
Acidificación de la tierra y el agua
Eutrofización
Formación de ozono troposférico
Agotamiento de recursos abióticos (elementos y fósiles)

Tabla 3. Categorías de impacto propuestas para el ACV en construcciones por el Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 350). Elaboración propia.

FASE 4-Interpretación: En la última fase, se interpretan los resultados obtenidos en las fases anteriores de acuerdo con los objetivos del estudio. Esta etapa también puede incluir la identificación de áreas de mejora y la comparación de diferentes alternativas.

La evaluación del Análisis de Ciclo de Vida es dinámica e iterativa (Fig.9), de forma que las cuatro fases que la componen están interrelacionadas. Por lo que, conforme se obtienen resultados, es posible replantear las hipótesis iniciales o mejorar los datos utilizados en cualquiera de las fases.¹²

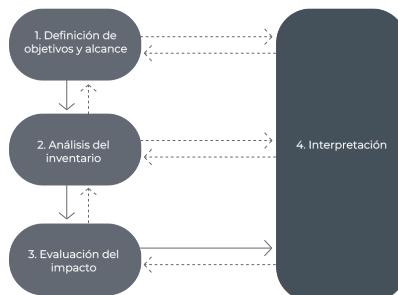


Figura 9. Esquema de metodología ACV. Elaboración propia a partir de cita 12.



Figura 10. Modelo de etiqueta de Certificación Energética.

De esta forma, gracias a herramientas como el ACV, es posible tomar decisiones considerando los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida, evitando evaluaciones limitadas a una sola etapa, como ocurre con la Certificación Energética (Fig.10). Esta herramienta evalúa dos impactos ambientales, el consumo energético y las emisiones de CO₂, pero centrándose únicamente en una etapa del ciclo de vida, el uso del edificio. Este enfoque puede llevar a contradicciones, ya que es posible obtener una mejor certificación energética a pesar de incrementar el consumo de energía primaria en términos globales, debido a que no se considera la energía incorporada en los materiales de construcción.¹²

Respecto a estos materiales y productos de construcción, gracias a el ACV, es posible evaluar cuantitativamente sus impactos ambientales, promoviendo la optimización y la etiquetado ecológica de los mismos, ya que en este análisis, se evalúan todos los procesos que abarcan desde la extracción y transformación de las materias primas hasta su utilización y eventual retorno a la naturaleza como residuos.

2. 4. El papel de los materiales en el desarrollo sostenible

El impacto ambiental de los materiales de construcción está relacionado con aspectos como la energía consumida, las emisiones incorporadas, el agotamiento de recursos materiales finitos y la acumulación no deseada de residuos en vertederos. Actividades como la extracción de materias primas, el procesamiento y la manufactura de materiales elaborados, el transporte, el uso de materiales peligrosos y la generación de residuos contribuyen directamente a la generación de estos impactos.¹³

Para reducir sustancialmente los impactos ambientales, no necesariamente debe optarse exclusivamente por materiales de origen natural, ya que en ocasiones pueden no resultar tan idóneos como se espera. Por ejemplo, la madera, considerada el material natural con bajo impacto ambiental por excelencia, podría presentar significativas desventajas en su proceso de obtención, tratamiento y transporte. Durante la primera fase de extracción, existe el riesgo de que la madera obtenida provenga de bosques explotados de forma inconsciente y sin certificación forestal¹⁴. El proceso de transformación puede implicar riesgos para la salud de los trabajadores, debido uso de materias tóxicas. Además, en la fase de transporte, el material a menudo recorre largas distancias (Fig.11). También se debe tener en cuenta la resistencia y durabilidad de este material, ya que presenta un gran desafío significativo; su resistencia al fuego.

Invitadamente, todos estos factores cuestionan los beneficios ambientales que pueden presentarse en primera instancia.



Figura 11. Comercio internacional de madera aserrada. Fuente: resourcetrade.earth

Como se ha podido ver, es importante tener una visión global del proceso de cada material para poder elegir correctamente en cada proyecto y conseguir reducir el impacto ambiental. Además, si se busca un cambio de paradigma en la construcción actual, es preciso que se enfoquen las técnicas de construcción y materiales actuales de una manera diferente.

13. Ching, F. D. K., Shapiro, I. M., & Jiménez Romero, C. (2015). Arquitectura ecológica: Un manual ilustrado. Barcelona: Gustavo Gili.

14. Cloquell, V., Contreras, W., & Owen, M. (2010). La madera y los recursos forestales en sistemas estructurales: Aspectos técnicos y medioambientales.

Teniendo en cuenta el panorama de desarrollo actual de las nuevas tecnologías, los impactos ambientales generados por la construcción podrían verse reducidos en gran medida mediante el uso de técnicas, que, aunque se compongan de materiales más convencionales, implementen enfoques novedosos en su ejecución.

Además, en el ámbito de la construcción sostenible, ha surgido un grupo de materiales que ha ganado importancia, aquellos que se basan en la utilización de residuos de construcción y demolición, mediante una gestión previa de dichos residuos. La gestión y reutilización de estos desechos son factores cruciales para abordar uno de los desafíos del sector de la construcción: reducir la producción, fomentar la reutilización y el reciclaje.¹⁵

Esta perspectiva de reciclaje se basa en la Economía Circular¹⁶, en la que se busca aprovechar al máximo posible los recursos materiales empleados en la construcción para alargar su ciclo de vida(Fig.12). Para evaluar este concepto, se emplean indicadores de circularidad, concepto que se desarrollará en apartados posteriores.



Figura 12. Modelo de economía circular. Fuente: Servicio de Investigación del Parlamento Europeo.

2. 5. Repensar el hormigón

Tras esta contextualización, teniendo en cuenta la versatilidad y las numerosas oportunidades de mejora en sus prestaciones e impactos ambientales, puede concluirse que el enfoque principal de este trabajo se centrará en repensar el hormigón como material de construcción. Además, tal y como se detallará en secciones posteriores, el hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción, tanto en España como en todo el mundo.²⁷

Para respaldar la elección del hormigón como material de estudio, se analizó este gráfico presentado en la figura 13, que ilustra el porcentaje de emisiones de CO₂ emitido a la atmósfera por cada material en una muestra tomada de viviendas VPO en Sevilla, sin embargo este modelo de construcción es fácilmente extrapolable al resto de España. Como se muestra, el hormigón es el material más significativo en términos de contribución, representando un 34,37% del total, lo que deja un gran margen de mejora implementando diferentes técnicas constructivas.

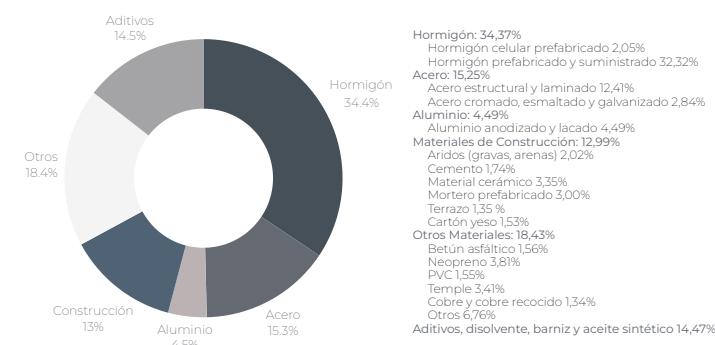


Figura 13. Emisiones de CO₂ de cada material. Fuente: Redibujado a partir de M. P. Mercader, A. Ramírez de Arellano, M. Olivares (2011). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. Informes de la Construcción, vol. 64 (n527), 401-414.

En los apartados posteriores se desarrollarán profundamente dos técnicas alternativas al hormigón convencional; el hormigón ciclópeo y el hormigón reciclado. Estas técnicas no solo ofrecen beneficios estructurales y ambientales, sino que también aportan identidad y carácter a los proyectos en los que se utilizan.

Además, se expondrán algunas líneas de investigación actuales de este material, demostrando la capacidad de este material a la evolución y adaptabilidad a las nuevas exigencias del sector de la construcción.

15. OERCO2. (2017). Online Educational Resource for Innovative Study of Construction Materials Life Cycle. Estudio de los materiales utilizados en la construcción en España. Recuperado de https://perco2eu/wp-content/uploads/2013/02/1.2.1.-Report-Construction-materials-in-Spain_ES.pdf

16. Parlamento Europeo. (24 de mayo de 2023). Economía circular: definición, importancia y beneficios. Recuperado de <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

27. Puertas, F., Alonso, M. M., & Palacios, M. (2020). Construcción sostenible. El papel de los materiales. Revista Material-ES, 4(4), 54-77

HORMIGÓN CONVENCIONAL

3.

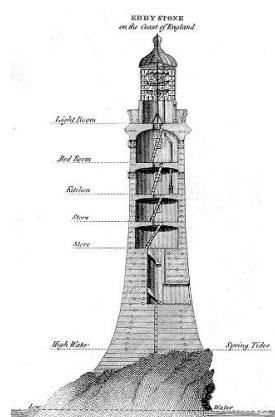


Figura 14. Faro de Eddystone, Inglaterra, 1759. Construida por John Smeaton se considera la primera estructura donde se emplea cemento.

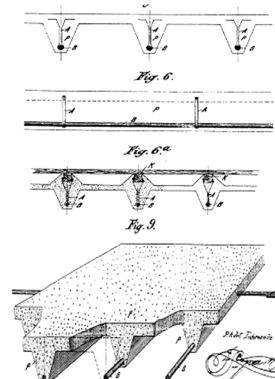


Figura 15. Viguetas Hennebique. Patente nº13652 (1892).

17. Calavera, J. (2003). Cálculos y conceptos en la historia del hormigón. En Discursos académicos de la Academia de ciencias e ingeniería de Lanzarote. Lanzarote.

18. Cordero, A.F., Abrio, M.T., & Maqueda, M.J. (2012). El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores identificativos de su resistencia. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, X.

(2) Coeficiente de elasticidad longitudinal: medida de rigidez en respuesta a la deformación longitudinal bajo una carga.

(3) Cantidad metálica: cantidad de refuerzo de acero en relación al volumen total del hormigón.

(4) Deformaciones conjuntas: Cómo diferentes tipos de deformaciones (elástica, plástica, fluencia, contracción y térmica) interactúan entre sí y afectan al comportamiento global del material.

3.1. Historia

Los inicios del uso del hormigón se remontan a la antigüedad, sin embargo, su evolución más notable se produjo en los siglos XIX y XX, en gran parte debido al redescubrimiento de este material a cargo de John Smeaton (Fig.15), una figura reconocida como uno de los pioneros de la ingeniería moderna.

Tras un largo periodo en el cual el hormigón en masa era la elección predominante en la construcción, comenzó a surgir la necesidad de dotar a las edificaciones de mayor resistencia. Como respuesta a esta necesidad se introdujo la técnica de hormigón armado.

Los primeros usos conscientes del hormigón armado ocurrieron en 1850 y 1855, pero estas creaciones resaltaban más por su valor estético que por su utilidad práctica. Al mismo tiempo se comenzó a explorar métodos para mejorar la resistencia y capacidad de carga del hormigón, de forma que el concepto de reforzar el hormigón con armaduras para aumentar su flexión comenzó a tomar forma en Europa. Uno de los pioneros en este campo fue François Hennebique¹⁷, quien obtuvo varias patentes en la década de 1890, las cuales establecieron las bases del hormigón armado como lo conocemos hoy. Hennebique desarrolló un sistema integral de construcción que abarcaba desde la cimentación hasta la cubierta, lo que marcó un avance significativo en la construcción moderna. A partir de sus investigaciones y avances, el hormigón armado se convirtió en una técnica ampliamente utilizada en la industria de la construcción, permitiendo la creación de estructuras más resistentes y versátiles. La patente de Hennebique (Fig.15) de 1892 se extendió con rapidez en España, y sus principales exponentes en nuestro país fueron el ingeniero José Eugenio Ribera, profesor en la Escuela de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Madrid, junto con su discípulo Eduardo Torroja.¹⁸

Hasta aproximadamente la mitad del siglo XIX, la construcción con hormigón armado se basaba en enfoques prácticos y experimentales que carecían de un sustento técnico sólido. Sin embargo, es a partir de este momento cuando aparecen los primeros estudios científicos racionales sobre el hormigón armado. Dos investigadores alemanes, Bach y Johann Bauschinger, jugaron un papel fundamental al presentar una serie de estudios en 1894 y 1895.

Estos dos expertos lograron fijar el coeficiente de elasticidad longitudinal⁽²⁾ y, lo que es más importante, introdujeron conceptos clave como la cuantía metálica⁽³⁾ y la relación entre las deformaciones conjuntas.⁽⁴⁾

Estos conceptos sentaron las bases para un enfoque más científico y matemático en el diseño y análisis de estructuras de hormigón armado.

3.2. Marco normativo

Hasta los primeros años del siglo XX, el proceso de calcular, diseñar y construir estructuras y elementos utilizando hormigón armado carecía de regulaciones, ya que esta etapa inicial se caracterizó por la ausencia de normativas estandarizadas que establecieran pautas para el uso de este material. A medida que avanzaba el tiempo, comenzaron a emergir normativas en distintos países, siendo Suiza la pionera en 1903 en implementar una regulación en este ámbito.¹⁹

Sin embargo, España destacó por ser un de los países más rezagados en la promulgación de reglamentaciones. No fue sino hasta el año 1939 que se estableció la Instrucción de Hormigón Estructural, conocida como "H-39". Esta regulación marcó el inicio del marco normativo para el cálculo, diseño y ejecución de estructuras con esta tecnología.

A partir de la década de 1960, se observó un aumento significativo en el uso del hormigón en la construcción. Una de las principales motivaciones detrás de este cambio fue la necesidad de construir de manera más rápida y eficiente. Además, el uso del acero estructural, especialmente en edificios altos con estructuras del gran envergadura, tenía ciertas limitaciones en términos de resistencia al fuego.

Por lo tanto, esto impulsa la necesidad de que en 1968 el Decreto 2987/1968 de 20 de septiembre, apruebe la Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado, EH-68.²⁰

En los años posteriores, en un lapso de aproximadamente 30 años, se promulgaron una serie de normativas sucesivas (EH-73, EP-77, EH-80, EH-82, EH-88, EH-91), que compartían un objetivo común, estas normativas buscaban garantizar la estabilidad de la estructura. En estas normativas, se fueron desarrollando métodos de cálculo más precisos y detallados, incluyendo el cálculo de hormigón pretensado por primera vez en la EP-77.

Estas normativas fueron estableciendo requisitos más específicos para los materiales utilizados. Se detallaron propiedades y características de los áridos, el cemento y el acero de refuerzo entre otros. Fue en la EH-91 cuando se reguló por primera vez el uso de aditivos en la mezcla de hormigón.

Sin embargo, durante la década de los 90, hubo un cambio de paradigma, ya que se comenzó a considerar no solo la estabilidad de las estructuras, si no también la durabilidad. En consecuencia, a través del Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre, se estableció la normativa EHE.²⁰

H-39	1939. "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón." Fue modificada y completada posteriormente.
EH-68	1968. "Proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado". Mayor calidad de construcción, aumentando los controles y requisitos.
EH-73	1973. "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado". Controles de calidad y relación de los coeficientes de seguridad con los niveles de control.
EP-77	1977. "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado.
EP-80	1980. Actualización de EP-77.
EH-80	1980. Actualización de EH-73.
EH-82	1982. Actualización de EH-80.
EH-88	1988. Actualización de EH-82.
EH-91	1991. Actualización de EH-88. Regulación del uso de aditivos en la mezcla.
EP-93	1993. Actualización de EP-80.
EHE	1998. "Instrucción de Hormigón Estructural". Unifica las instrucciones anteriores en un único texto. Mayor importancia a la durabilidad de la estructura.
EHE-08	2008. Actualización de normativa introduciendo Eurocódigos y novedades técnicas. Aparición del Código Técnico. Anexo 13: Contribución de las estructuras a la sostenibilidad.
CE	2021. "Código Estructural". Reglamentación de estructuras de hormigón, acero y mixtas. Actualización de normativa. Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES).

Figura 16. Línea temporal de la normativa española del hormigón. Fuente: elaboración propia.

19. Decreto 2987/1968. (1968). Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Boletín Oficial del Estado, núm. 290, páginas 17257 a 17291.

20. Cruz Ramos, D. (2020). Los áridos como materia prima en la normativa de hormigón en España. En V Congreso Nacional de Áridos. Recuperado de <https://www.concretonline.com/aridos/los-aridos-como-materia-prima-en-la-normativa-de-hormigon-en-espana>

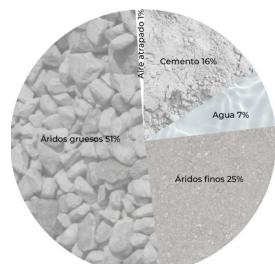


Figura 17. Elaboración propia a partir de imagen de Cementos Bio Bio.

La introducción de conceptos de sostenibilidad en las normativas fue escasa y de no obligado cumplimiento, siendo la EHE-08 la primera instrucción en presentar una metodología para evaluar la contribución de las estructuras a la sostenibilidad (Anejo 13)²¹, el Código Estructural (CE) aprobado en 2021²² profundizó significativamente en ese aspecto y estableció una nueva metodología para calcular el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES). De acuerdo al Anejo 2 del Código Estructural²³, el ICES se define como la suma de las contribuciones de cada uno de los procesos involucrados en su proyecto y construcción, incluyendo los de fabricación y transformación de los materiales que incorpora.

Como se ha podido observar, a lo largo del tiempo, las normativas del hormigón han ido evolucionando para satisfacer las necesidades de cada periodo. Progresivamente, estas normativas se han centrado en aspectos cruciales como la estabilidad, la durabilidad y más recientemente, la sostenibilidad.

3.3. Composición y obtención de materias

El hormigón puede definirse como el material resultante de una mezcla precisa de áridos finos (como arena), áridos gruesos (como grava), un aglomerante (generalmente cemento Portland²⁴) y agua en las debidas proporciones (Fig.17). El volumen de los áridos ocupa de un 60 a un 80% del volumen total del hormigón, mientras que el otro 20-40% se forma por el agua y el cemento. Además, en el momento de su amasado, es posible agregar aditivos o materiales adicionales para mejorar ciertas propiedades del hormigón, como su resistencia al agua, su capacidad de flujo o su resistencia a temperaturas extremas.²⁴

Estos componentes son los que forman el hormigón en masa, el cual tiene una gran capacidad de resistir cargas a compresión, pero una baja resistencia a la tracción. Para lograr esta resistencia a tracción, se requiere la incorporación de barras de acero, transformando así el hormigón en masa en hormigón armado.

La calidad del hormigón, englobando aspectos como la resistencia, durabilidad y demás propiedades inertes²⁵, está intrínsecamente ligada a un serie de factores fundamentales, en los cuales resaltan la cantidad de agua incorporada en la mezcla y la proporción del cemento presente en dicha composición. Estos dos elementos, agua y cemento, entran en una reacción química conocida como hidratación, proceso por el cual el cemento se transforma en compuestos cristalinos aportando resistencia al hormigón.

21. Ministerio de Fomento. (2008). Anejo 13: Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad. En EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural.

22. Ministerio de Fomento. (2021). Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. En Boletín Oficial del Estado, núm. 190, páginas 97664 a 99452.

23. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). Anejo 2: Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad. En Código Estructural.

24. Sika Corporation. (2010). Manual del Hormigón.

(5) Cemento Portland: polvo de cemento compuesto principalmente por silicatos de calcio, junto con una menor cantidad de aluminatos de calcio.

(6) Propiedades inertes: características que no cambian en respuesta a factores externos y no participan en reacciones químicas o físicas significativas (densidad, porosidad, composición d los agregados, color, conductividad térmica, etc).

El nivel de curado desempeña un rol crucial en este contexto, ya que asegura que la hidratación evolucione adecuadamente. En general es recomendando que este proceso de curación dure al menos 7 días para hormigones convencionales, sin embargo, en algunos casos cuando se requiere una mayor resistencia o durabilidad este proceso puede extenderse hasta 28 días. Por lo tanto, la combinación correcta de agua y cemento, y un adecuado proceso de curado son esenciales para garantizar la calidad del hormigón.

El elemento principal de la composición del cemento es el clinker Portland, un material hidráulico²⁶. El proceso de fabricación de esta composición (Fig.18) consiste en la trituración de una mezcla de clinker (40-95%) y yeso (alrededor de 5%), y en algunos casos, se añaden otros componentes secundarios o “adiciones” como escoria, caliza, puzolana o cenizas volantes.²⁵

En el proceso de producción del clinker (Fig.19), se emplea piedra caliza y piedra arcillosa en forma de pequeñas esferas de entre 5mm y 25 mm. Estos materiales se extraen de cantera, se trituran y se mezclan en proporciones determinadas. Luego, la mezcla se somete a molienda y posteriormente se introduce un horno rotativo donde se cuecen a altas temperaturas ($>1.400^{\circ}\text{C}$).

Atendiendo a la composición, hay 5 tipos de cemento en la industria, cada variedad es producida con el propósito de satisfacer los requisitos físicos y químicos para fines específicos.

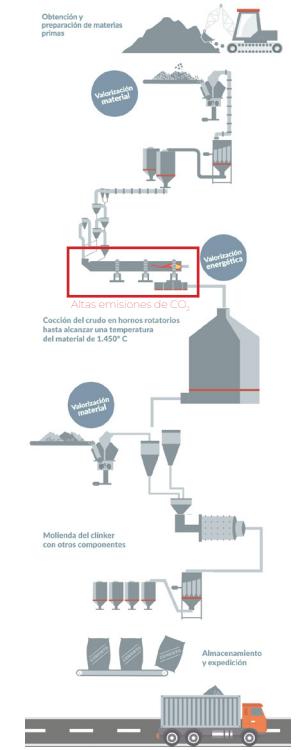


Figura 18. Proceso de fabricación del cemento.

Tipo	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa %)									Componente minoritario
			Componentes principales			Componentes secundarios						
CEM I	Cemento pórtland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con escoria	CEM II/A-S	80-84	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con escoria	CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con humo de silice	CEM II/A-S	80-84	—	6-10	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con humo de silice	CEM II/A-P	80-94	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con puzolana	CEM II/B-P	65-79	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con puzolana	CEM II/A-Q	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con puzolana	CEM II/B-Q	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con ceniza volante	CEM II/B-V	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0.5
CEM II	Cemento pórtland	CEM II/A	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland	CEM II/B	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland con escoria calcinada	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0.5
	Cemento pórtland con escoria calcinada	CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0.5
	Cemento pórtland con caliza	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0.5
	Cemento pórtland con caliza	CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0.5
	Cemento pórtland compuesto ²⁷	CEM II/M	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland compuesto ²⁷	CEM II/M	55-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento pórtland compuesto ²⁷	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento de horma alto	CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	0.5
CEM III	Cemento de horma alto	CEM III/C	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento puzolárico ²⁸	CEM IV/A	65-89	—	—	11-35	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento puzolárico ²⁸	CEM IV/B	45-64	—	—	36-55	—	—	—	—	—	0.5
CEM IV	Cemento puzolárico ²⁸	CEM V/A	40-64	18-30	—	—	18-30	—	—	—	—	0.5
	Cemento puzolárico ²⁸	CEM V/B	30-54	31-41	—	—	31-49	—	—	—	—	0.5

21) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (masaje de cemento).

22) El porcentaje de humo de silice está limitado al 10%.

23) El cemento puzolárico es el CEM IV/M, en cementos puzoláricos, CEM IV/A y CEM IV/B, y en cementos compuestos, CEM V/A y CEM V/B. Los componentes principales diferentes del clinker deben ser declarados en la descripción del cemento (ver el apartado A1.1).

24) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme a la norma UNE-EN 13838, será inferior al 0,20% en masa para calizas L1, o inferior al 0,50% en masa para calizas L2.

25) La cifra de 100% se refiere a la suma de todos los componentes principales y minoritarios adicionales. Se subraya que el cemento final es la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales más el sulfato de calcio necesario y cualquier activo.

Tabla A1.1a. Cementos comunes



Figura 19. Composición del clinker.

En lo que respecta a la tipificación de los hormigones, se cumple con las pautas delineadas en el artículo 33.6 del Código Estructural:²⁶

T - R/C/TM/A

(7) Material hidráulico: sustancia que tiene la propiedad de endurecerse y adquirir resistencia al contacto con el agua. Estos materiales tienen la capacidad de fraguar y endurecer bajo condiciones húmedas o en presencia de agua.

25. Realidad MAPEI (2023). Especial Aditivos y Descarbonización, número 31. Aditivos y Molida Ecosostenible, páginas 18-22.

26. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). Capítulo 8: Estructuras de Hormigón. Propiedades tecnológicas de los materiales. En Código Estructural.

donde:

- T: Indicativo que será HM en el caso de hormigón en masa, HA en el caso de hormigón armado, HP en el de pretensado.
- R: Resistencia característica especificada, en N/mm².
- C: Letra inicial del tipo de consistencia.
- TM: Tamaño máximo del árido en milímetros.
- A: Designación del ambiente.

3.4. Problemática ambiental

El hormigón de cemento Portland es el principal material de construcción y ocupa el segundo lugar en términos de uso, justo después del agua, como uno de los recursos más empleados por el ser humano, según un artículo publicado por Sociemat del CSIC.²⁷ A nivel global, la producción anual de este material excede los 3 billones de toneladas. Este material ha sido y sigue siendo un material clave que ha contribuido significativamente a mejorar la calidad de vida de las personas y al progreso de la sociedad a través de diversas obras del ingeniería e infraestructuras. Sin embargo, “la producción de cemento Portland es responsable de aproximadamente el 7-8% de las emisiones mundiales de CO₂, que, junto con el agotamiento de los recursos naturales como los agregados y el agua, ha dado lugar a una creciente preocupación por la sostenibilidad de la construcción de hormigón e iniciado una transformación global hacia la neutralidad climática”.²⁸

A nivel global, la producción anual de este material excede los 3 billones de toneladas, generando alrededor del 8% de las emisiones mundiales de CO₂.²⁸

Esto es debido a que, durante el proceso esencial de calentamiento de las materias primas, se produce la descarbonatación de la piedra caliza mediante una reacción química conocida como calcinación. Esta transformación convierte la piedra caliza en cal y dióxido de carbono (CO₂) generando aproximadamente el 60-65% de las emisiones de CO₂ del proceso de fabricación del cemento, denominado emisiones de proceso, se estima que por cada tonelada de clinker se liberan 900kg de CO₂.²⁵ La fracción restante de las emisiones de CO₂ proviene de los combustibles utilizados para calentar el horno, lo que se conoce como emisiones de combustión.²⁹

Este material ha sido y sigue siendo un material clave que ha contribuido significativamente a mejorar la calidad de vida de las personas y al progreso de la sociedad a través de diversas obras del ingeniería e infraestructuras. Sin embargo, la gran cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera, “junto con el agotamiento de los recursos naturales como los agregados y el agua, ha dado lugar a una creciente preocupación por la sostenibilidad de la construcción de hormigón e iniciado una transformación global hacia la neutralidad climática”.²⁸

Desde hace años, la industria del cemento ha estado dedicando grandes esfuerzos para mejorar su impacto ambiental, logrando una reducción aproximada del 27% en sus emisiones totales de CO₂ en comparación con los niveles de 1990.

En 2017, Oficemen (Asociación de Fabricantes de Cemento de España) desarrolló una hoja de ruta²⁹ que delineaba una ambiciosa meta de reducción del 80% en las emisiones de CO₂ para el año 2050. (Fig.20)

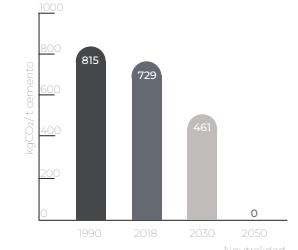


Figura 20. Hitos hacia la neutralidad climática a 2050. Niveles de emisión. Fuente: Elaboración propia a partir de Hoja de Ruta Oficemen.

La reciente introducción del Pacto Verde Europeo³⁰ (Fig.21), que busca convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro para 2050, ha generado un cambio de paradigma que demanda una visión aún más audaz por parte de la industria. En respuesta a estas iniciativas, el sector del cemento está acelerando sus acciones y comprometiéndose con medidas que abarcan desde inversiones en eficiencia energética hasta la disminución de emisiones de CO₂.

El objetivo es avanzar hacia un “Hormigón Verde”, que implica reducir el impacto ambiental de la producción del hormigón sin comprometer las necesidades de la sociedad en términos de construcción. Para lograr este objetivo, se plantea la necesidad del establecer regulaciones y leyes más estrictas a nivel nacional e internacional en relación con el medio ambiente. También se busca concienciar a los usuarios, constructores y arquitectos sobre la importancia de adoptar prácticas más sostenibles en la construcción.²⁸



Figura 21. Pacto Verde Europeo.

El sector cementero pretende poner en marcha una estrategia sectorial:²⁹ “el Enfoque de las 5Cs, que promueve la colaboración de toda la cadena de valor Clínker-Cemento-Hormigón-Construcción-(re)Carbonatación, para convertir en realidad la visión de la neutralidad climática.”

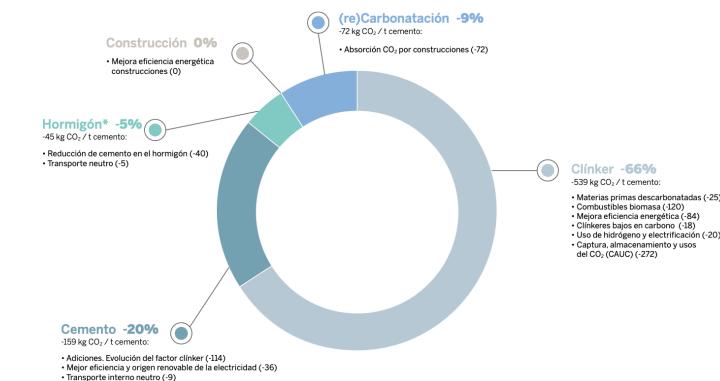


Figura 22. Objetivo 2050: Neutralidad Climática. Fuente: Hoja de Ruta Oficemen.

A continuación, se expondrán y analizarán teóricamente las técnicas constructivas alternativas al hormigón convencional seleccionadas, ejemplificándolas con viviendas construidas. Estas técnicas tienen como premisas la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, la reutilización de materiales, y como valor añadido, la generación de una identidad arquitectónica que se relaciona con el entorno.

25. Realidad MAPEI (2023). Especial Aditivos y Descarbonización, número 31. Aditivos y Molienda Ecosostenible, páginas 18-22.

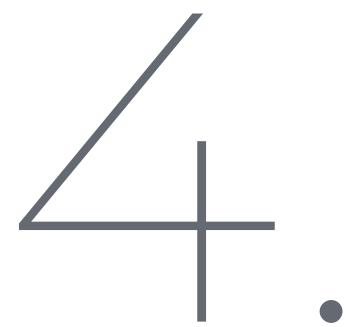
27. Puertas, F., Alonso, M. M., & Palacios, M. (2020). Construcción sostenible. El papel de los materiales. Revista Material-ES, 4(4), 54-77.

28. Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. Developments in the Built Environment, 15, 10077.

29. Asociación de Fabricantes de Cemento de España (Oficemen). (2020). Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050.

30. Consejo Europeo (2024). Pacto Verde Europeo. Recuperado de <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

HORMIGÓN CICLÓPEO



4.1. Contexto

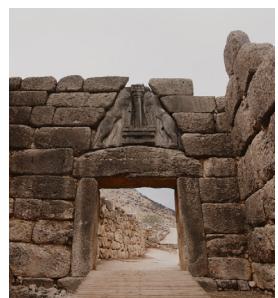


Figura 23. Puerta de los Leones de Micenas (Grecia). Fuente: José Álvarez Fotografía.

El origen de las construcciones ciclópeas, aunque puede atribuirse a diferentes civilizaciones, es especialmente identificativo con la antigua Grecia (Fig.23). El nombre de esta técnica proviene de los cíclopes, que según la mitología griega eran criaturas místicas gigantes con un solo ojo en la frente. Se creía que estas criaturas habían construido las estructuras ciclópeas debido al gran tamaño de las piedras utilizadas. Estas grandes piedras se superponían entre sí y sin argamasa, para ergir diversas estructuras como murallas, templos y tumbas.³¹

El hormigón ciclópeo representa una fusión entre esta antigua técnica y métodos de construcción más contemporáneos. Se distingue del hormigón convencional principalmente por el tamaño del agregado grueso, incorporando piedras de gran tamaño y careciendo de armadura. Al incluir piedras más grandes, se requiere un volumen menor de cemento, lo que hace que muchos proyectos sean más viables y económicos. Además, si las rocas añadidas son del entorno, la construcción se vuelve aún más económica y sostenible.



Figura 24. Muro de contención. Fuente: EcoGreen Construcciones.



Figura 25. Reconstrucción con muros ciclópeos del canal La Quebrada Caroata. (Caracas) 2004. Fuente: EcoGreen Construcciones.

En la arquitectura contemporánea, se utiliza en casos específicos donde los requerimientos estructurales lo permiten, es decir, donde las resistencias demandadas por la estructura son bajas, o cuando estos elementos no reciben cargas estructurales.

4.2. Marco normativo y aplicaciones

El hormigón ciclópeo se emplea principalmente en la construcción de cimentaciones para edificios, puentes y otras obras civiles, brindando una sólida base capaz de soportar cargas importantes. También se utiliza en la construcción de muros de contención y protección (Fig.24), siendo una opción idónea para prevenir la erosión del suelo y resistir la agresión del agua en puertos y costas. Además, en proyectos hidráulicos como presas y diques (Fig.25), el uso del hormigón ciclópeo es beneficioso por su capacidad de resistir la presión del agua y mantener la estabilidad estructural. En obras de infraestructura vial, este material puede ser empleado para elementos como barreras de seguridad y muros de contención.³¹

Estos son algunos de los usos más comunes del hormigón ciclópeo hasta ahora, aunque afortunadamente, cada vez se utiliza más en edificios con el objetivo de que esta técnica aporte un valor añadido a la arquitectura. (Fig.26 y 27)

Respecto a la normativa vigente, el Código Estructural no incluye instrucciones específicas acerca de esta solución constructiva. Por lo tanto, es preciso recurrir a información proporcionada por industrias.

Según la empresa Becosan³², las principales especificaciones técnicas que definen al hormigón ciclópeo y sustentan la elaboración del mismo son:

-El tamaño máximo del agregado grueso (canto rodado), debe variar entre 15 centímetros como mínimo y 30 centímetros como máximo.

-Es imprescindible que estas piedras estén en las mejores condiciones, completamente limpias, sin rastro de polvo, barro o daños visibles. Además, es importante evitar que tengan caras largas y aplanas.

-La proporción de cantes rodados en la mezcla debe oscilar entre el 40% y el 50% del volumen total del hormigón utilizado. Por ejemplo, si el tamaño máximo del agregado grueso es 25 centímetros, la proporción correspondiente sería del 40% del hormigón.

-La cantidad adecuada de hormigón a utilizar se encuentra en el rango de 120 a 150 kgf/m³.

-En lugar de someter el hormigón a procesos de vibrado para asegurar su distribución homogénea, se sugiere introducir repetidas veces una varilla de hierro de 12 o 15 milímetro en el hormigón fresco con movimientos vitrales para eliminar los vacíos de aire de la mezcla.

-Al verter el hormigón es crucial no lanzar bruscamente en agregado grueso sobre la mezcla, si no distribuirlo meticulosamente o colocarlo con suavidad para impedir la formación de vacíos.

-La separación máxima permitida entre los cantes rodados embebidos en masa debe ser de 15 centímetros, mientras que la separación máxima entre éstos y la superficie de coronación debe ser de 20 centímetros. No obstante, en estructuras con espesores menores a 80 centímetros, la distancia máxima entre las piedras y la superficie final será de 10 centímetros.

-Con el objetivo de evitar asentamientos, es primordial no colocar los cantes rodados sobre el suelo del terreno, sino que se debe implementarse un solado, una capa de 5 a 10 centímetros de espesor de hormigón de limpieza para servir de soporte a los cantes rodados.



Figura 26. Casa del horizonte por Jesus Aparicio (Salamanca, 1996-2006). Fuente: Revista Arquitectura Viva.



Figura 27. Inserción en la Universidad de Yale, Stiles and Mors College por Eero Saarinen (EEUU, 1959-61). Fuente: Blog Cajón de Arquitecto.

31. Maiztegui, B. (2021, octubre 25) "¿Qué es el hormigón ciclópeo? Diversos usos y aplicaciones en obras de arquitectura" ArchDaily en Español. <https://www.archdaily.cl/cl/962231/que-es-el-hormigon-ciclopeo-diversos-usos-y-aplicaciones-en-obra-de-arquitectura>.

32. Becosan. (2020, 18 de junio). Concreto ciclópeo. Recuperado de <https://www.becosan.com/es/concreto-ciclopeo/>



Figura 28. Colocación de los bolos en la base del encofrado. Fuente: Blog IEB.



Figura 29. Vertido del hormigón. Fuente: Blog IEB.

4.3. Composición y obtención de materias

Este tipo de hormigón está compuesto por dos elementos principales: agregado de gran tamaño, en concreto canto redondo con dimensiones que oscilan entre 15 y 30 cm de diámetro, y hormigón HM-20/P40/X0³³. Este último es fabricado en central y vertido desde camiones posteriormente. Se trata de un hormigón en masa con una resistencia característica de 20 MPa y consistencia plástica al momento de su recepción en obra. Además, el tamaño máximo permitido del árido es de 40 mm y no presenta riesgo de deterioro por corrosión.

La proporción en la que se combina esta mezcla es del 60% de hormigón en masa y el 40% restante corresponde al canto rodado, aunque esta proporción podría variar llegando incluso a un equilibrio de 50-50.

Para que esta técnica resultase lo más respetuosa posible con el medio, podría llegar a sustituirse el cemento Portland por arenas y gravas calcáreas, reduciendo notablemente la toxicidad de la construcción. Esta sustitución no puede darse en elementos de hormigón armado, dado que la cal causa la oxidación del hierro de las armaduras, poniendo en peligro la solidez de la estructura.

Sin embargo, tal y como describe el IEB (Instituto Español de Baubiología, 2023)³⁴, llevar esta mezcla de cal a la obra, a veces, puede ser algo complicado porque la cal, de momento, se encuentra fuera de las principales redes de distribución. Sin embargo, este hormigón se puede realizar en obra en cantidades pequeñas sin ningún problema y en caso de querer trabajar con mayores volúmenes, en ocasiones, se han vertido en obra los sacos de cal al camión hormigonera que trae de cantera el resto de los componentes.

4.4. Proceso de ejecución

-Preparación del sitio: Se debe limpiar y nivelar el terreno donde se construirá el muro, ya que es importante tener una base firme y estable para el muro.

-Cimentación: Se excava una zanja en el suelo y se vierte una capa de hormigón como cimentación para el muro. Esta cimentación proporcionará una base sólida para el muro y ayudará a distribuir la carga de manera uniforme.

-Colocación de piedras: Se colocan las piedras grandes sin labrar (agregado ciclópeo) en la capa de hormigón fresco, asegurándose de que estén bien distribuidas y en contacto con el hormigón. Las piedras deben estar limpias y libres de tierra o materiales sueltos.(Fig.28)

-Encofrado: Se coloca un encofrado alrededor del área donde se construirá el muro. El encofrado actúa como un molde para contener el hormigón mientras fragua y toma la forma deseada.

-Vertido del hormigón: Se vierte el hormigón en el área entre las piedras y dentro del encofrado. Es importante asegurarse de que el hormigón llene todos los espacios y se compacte adecuadamente alrededor de las piedras.(Fig.29)

-Compactación: Se utiliza una varilla de hierro para compactar el hormigón y eliminar posibles bolsas de aire, lo que garantiza una mayor resistencia y durabilidad.

-Nivelación y acabado: Se nivelan y alisan las superficies del hormigón en el muro para obtener una apariencia uniforme y estética. (Fig.31)

-Curado: Despues del vertido, el hormigón debe ser adecuadamente curado para ganar resistencia. El curado implica mantener el hormigón húmedo y protegido de la exposición excesiva al sol o viento durante un período de tiempo determinado.

4.5. Propiedades

Respecto a la propiedad mecánica del hormigón ciclópeo, su resistencia a la compresión está determinada por la proporción del canto rodado utilizado en su mezcla, que a su vez se encuentra influenciada por la proporción de hormigón simple. Como resultado, no hay un valor único de esfuerzo de compresión para este tipo de material.

Según indica Becosan “se ha establecido que para un hormigón ciclópeo con 30% de canto rodado el esfuerzo de compresión mínimo debe ser 21 MPa, mientras que para uno con 40% de piedra la resistencia de compresión mínima debe ser 17,5MPa”³²



Figura 30. Repetición de la colocación de piedras y vertido de hormigón. Fuente: Blog IEB.



Figura 31. Colocación de piedras en punta como arranque/unión con el muro. Fuente: Blog IEB.

4.6. Investigación: Evaluación del Ciclo de Vida y comparación entre hormigón ciclópeo y hormigón convencional.

Actualmente, el estudio de esta técnica todavía se encuentra en temprano desarrollo con el objetivo de abalar la sostenibilidad y rentabilidad del hormigón ciclópeo, sin embargo, el análisis comparativo realizado por Abathar Al-Hamrani, Doyoon Kim, Murat Kucukvar y Nuri Cihat Onat³⁵ pone en evidencia la reducción de cargas ambientales y económicas de este sistema frente al hormigón convencional.

En este caso, usando las propias rocas obtenidas de las excavaciones previas en el lugar, el hormigón ciclópeo se utilizó en la construcción de los cimientos de un estadio de fútbol destinado a la Copa del Mundo de Qatar 2022. (Fig.32) Los objetivos de esta investigación son, por una parte, realizar un ACV ambiental comparativo en detalle del hormigón ciclópeo (*cyclopean concrete, CYC*) y el hormigón convencional (*conventional concrete, CC*), a partir de los procesos de fabricación,



Figura 32. Education City Stadium. Fuente: World Walkerz.

33. Según datos proporcionados por el generador de precios CYPE.

34. Instituto Español de Baubiología. (2022). Cimentaciones de hormigón ciclópeo. Recuperado de <https://www.baubiologia.es/cimentaciones-de-hormigon-ciclopeo/>

32. Becosan. (2020, 18 de junio). Concreto ciclópeo. Recuperado de <https://www.becosan.com/es/concreto-ciclopeo/>

35. Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.



Figura 33. Pasos para realizar un ACV comparando hormigón convencional y hormigón ciclópeo. Elaboración propia a partir de cita 35.



Figura 34. Fase de excavación en la construcción del estadio. Fuente: BDP Pattern.

(8) *Unidad funcional:* medida de referencia para cuantificar y comparar los impactos ambientales, permitiendo comparar los procesos respecto a su rendimiento y contribución a una función específica.

transporte y el tratamiento de los residuos generados, y por otra parte, investigar la eficiencia del método desarrollado para reducir el consumo de recursos, prevenir las emisiones innecesarias de transporte, minimizar la generación de recursos y ahorrar costes.

La metodología para llevar a cabo la comparativa del ciclo de vida está reflejada en la figura 33.

PRIMER PASO: El proyecto *Education City Stadium* (ECS), uno de los estadios de la FIFA WC 2022, utilizó la técnica de hormigón ciclópeo para reutilizar 45.000 m³ de rocas previamente excavadas del lugar (Fig.34). Este proceso incluyó cortar, seleccionar, lavar y comprobar la resistencia de las rocas en un laboratorio. La implementación de esta técnica busca reducir el impacto ambiental del hormigón, evaluar su contribución a la Visión Nacional de 2030 de Qatar y alcanzar un evento de la FIFA WC ecologicamente más responsable.

SEGUNDO PASO: Antes de comenzar la recopilación de datos, es necesario definir los límites del sistema (Fig.A y B del Anexo). La definición de estos límites comienza especificando los parámetros de entrada en los que se evaluará el rendimiento ambiental y económico de ambos tipos de hormigón, estos parámetros incluyen:

- 1) Materias primas necesarias para la producción de hormigón armado, como cemento, arena, agregados, rocas y armaduras.
- 2) Agua necesaria para la mezcla de hormigón y para la limpieza de hormigoneras y camiones-bomba de hormigón.
- 3) Diesel para ser consumido por las máquinas en la obra y para el transporte de materiales de construcción.

Posteriormente se identifican las actividades con mayor impacto, incluyendo la producción, transporte, bombeo, vertido y limpieza. La producción abarca la fabricación de los componentes del hormigón y sus impactos hasta que salen de fábrica. En el transporte, se considera el combustible usado por las hormigoneras y los camiones de bombeo desde la planta hasta la obra. Finalmente, se cuantifica la cantidad de agua utilizada en la limpieza de la maquinaria.

Analizando la cantidad consumida de los parámetros de entrada en el sistema de límites definido, las salidas asociadas se calcularon en función de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al aire (CO₂, N₂O y CH₄), las rocas desechadas y el coste financiero total.

La unidad funcional se define como la zona bajo la cimentación del estadio, que construía un volumen total de 18.000 m³.

TERCER Y CUARTO PASO: Despues de identificar los límites del sistema, se recopilaron los datos sobre las proporciones de la composición del hormigón (Tabla 5), las emisiones de CO₂ liberadas de cada material (emisiones de CO₂ equivalente⁽⁹⁾) (Tabla 6) y la eficiencia del combustible para la maquinaria de obra (Tabla 7). Estos datos se obtuvieron a través del contratista, de la base de datos Ecoinvent v3.6. y de un informe local de sostenibilidad.

Cabe destacar que el impacto ambiental de cada tipo de hormigón se evaluó en términos de emisiones de CO₂-eq que resultaron durante toda la vida útil del producto. Mientras que el impacto económico se evaluó en base a las materias primas consumidas, como cemento Portland, agregados gruesos, arena fina, acero estructural, combustible y agua.

QUINTO PASO: Los cálculos detallados del análisis del rendimiento económico y ambiental del hormigón ciclópeo y el hormigón convencional se encuentran en la Tabla A y B del anexo. Estos datos se obtuvieron a partir de las siguientes cálculos:

1. Emisiones CO₂ equivalentes de cada material:

$$\text{Emisiones CO}_{2\text{-eq}} = Q \times EF$$

donde Q es la cantidad de cada material y EF el factor emisivo de la Tabla 6.

2. Asignar cada maquinaria a su actividad correspondiente y seleccionar la eficiencia del combustible indicada en la Tabla 7.

3. Emisiones CO₂ equivalentes de cada proceso, excluyendo las emisiones liberadas durante los procesos de fabricación de los ingredientes del hormigón reciclado

$$\text{Emisiones CO}_{2\text{-eq}} = CF \text{ (litros)} \times 2.7 \text{ kg CO}_2 \text{ - } \frac{\text{eq}}{\text{litros}}$$

donde CF es la cantidad de combustible utilizado.

4. Cálculo de consumo de combustible para el transporte de hormigón y piedras (CFT).

$$CFT = \text{Num de trayectos} \times D \left(\frac{\text{km}}{\text{viaje}} \right) \times EF \left(\frac{\text{litro}}{\text{km}} \right)$$

donde D es la distancia de trayecto y FE es la eficiencia del combustible.

5. Cálculo del combustible consumido para la excavación de rocas (CFR) y la descarga de hormigón (CFD).

$$CFR = \frac{VB \text{ (m}^3\text{)}}{ER \text{ (m}^3\text{/hora)}} \times FE \left(\frac{\text{litro}}{\text{hora}} \right) \quad CFD = \frac{CV \text{ (m}^3\text{)}}{DR \text{ (m}^3\text{/hora)}} \times FE \left(\frac{\text{litro}}{\text{hora}} \right)$$

Material	CC	CYC	Precio
Portland	5.762 t	4.365 t	60,42 \$/t
Agregado grueso	21.606 t	16.366 t	20,60 \$/t
Arido fino	5.762 t	8.183 t	9,61 \$/t
Agua	3.186 m ³	2.400 m ³	5 \$/m ³
Rocas excavadas	-	6.500 m ³	-
Vol.total de hormigón	18.000 m ³	13.637 m ³	-

Tabla 5. Proporciones de composición de las mezclas. CC: Hormigón Común, CYC: Hormigón ciclópeo.

Material	Factor emisivo	Unidad
Portland	0.8	kg CO ₂ -eq/kg
Agregado grueso	0.04	kg CO ₂ -eq/kg
Arido fino	0.004	kg CO ₂ -eq/kg
Refuerzo de acero	1.31	kg CO ₂ -eq/kg

Tabla 6. Factores de emisión de CO₂-eq de los componentes del hormigón.

Tipo de maquinaria	Eficiencia del combustible
Martillo hidráulico	32,52 l/h
Pala de ruedas	16,43 l/h
Camión hormigonera	Vacio: 0,714 l/km Lleno: 0,84 l/km 11,13 l/h
Bomba de hormigón	0,3 l/km 26,6 l/h
Camión basculante	0,368 l/km

Tabla 7. Eficiencia del combustible de máquina pesada en obra.

(9) CO₂ equivalente: cantidad de GEI emitidos durante el ciclo de vida de un material en términos de la cantidad de CO₂ que tendría en mismo efecto en el calentamiento global. Incluye gases como el metano, CH₄, y el óxido nitroso N₂O convertidos a su equivalente en CO₂ según su potencial de calentamiento global (GWP).

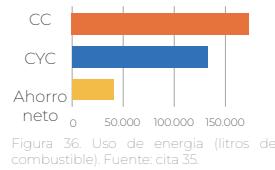


Figura 36. Uso de energía (litros de combustible). Fuente: cita 35.

donde VB es el volumen de rocas excavadas, ER es la tasa de excavación, CV es el volumen del hormigón y DR es la tasa de descarga del hormigón.

6. Cálculo del coste (C) de cada material:

$$C = Q \times EF$$

donde Q es la cantidad de cada material y P es el precio unitario obtenido de la Tabla 5.

SEXTO PASO: Según los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la mayor parte de las emisiones de CO₂ equivalente se originaron en la etapa de producción de los ingredientes utilizados en el hormigón. Esto representa aproximadamente el 94% de las emisiones totales de ambas técnicas, tanto el hormigón ciclópeo como el hormigón convencional. De estas emisiones, el 53% se atribuyó a la producción de cemento. En segundo lugar, alrededor del 5% de las emisiones provinieron del traslado de los materiales y componentes hacia el lugar de la obra. Por último, solo el 1% de las emisiones totales se generó debido a los procesos de excavación, vertido y limpieza.

Estableciendo una comparativa general entre el hormigón convencional (CC) y el hormigón ciclópeo (CYC), se pueden observar claros beneficios gracias al uso de hormigón ciclópeo:

-Disminución del consumo de materias primas en el proceso de construcción. (Fig.35)

-Evitar generar parte de los residuos de construcción y demolición, ya que las rocas extraídas de la excavación se reutilizan.

-Ahorro de combustible (Fig.36), lo que equivale a una gran reducción de misión de CO₂ equivalente. (Fig.37)

-Reducción del agua utilizada. (Fig.38)

-Reducción del coste de la obra. (Fig.39)

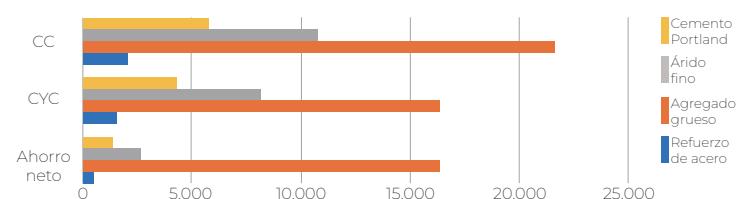


Figura 35. Cantidad de material usado (toneladas). Fuente: cita 35.

Estos datos reflejan la importancia de abordar la producción de los componentes del hormigón, especialmente el proceso de fabricación del cemento Portland, como un área clave para reducir las emisiones de CO₂ eq en proyectos de construcción. La utilización del hormigón ciclópeo junto con el uso de mortero de cal como sustitutivo del cemento Portland pueden contribuir significativamente a la reducción del impacto ambiental en la industria de la construcción mitigando las emisiones de CO₂ eq, como sucede en el caso de estudio de Casa 1413 proyectada por Harquitectes. (Fig.44)

4. 7. Caso de estudio: Casa 1413, Harquitectes



Esta casa está situada en un pequeño pueblo de Girona, Ullastret. Este pueblo de origen rústico posee un núcleo urbano amurallado y una fábrica urbana muy densa (Fig.40). El encargo se realizó por parte de una familia de Barcelona, con el objetivo de proyectar una casa vacacional.

Josep Ricart Ulldemolins (miembro de Harquitectes), en el ciclo de charlas 2020 Historias Mínimas³⁶ explica que el proyecto se basó en el

concepto de relación entre espacio y estructura, para diseñar espacios que estaban definidos geométricamente a través de su estructura. "Estructura y aire, uno no se explica sin el otro, no hay intermediario entre la estructura y el aire contenido, no hay cerramiento. Estos espacios quedaban definidos por la masa, por la estructura"

La característica primordial que definía al solar de actuación es que estaba rodeado por unos muros de piedra que llegaban hasta los 3,5 metros en algunos puntos (Fig.41). Este tipo de cerramiento es típico en las parcelas agrícolas de la zona.

La primera idea fue hacer una casa apoyada en este muro original generando un gran porche, ya que además resultaba conveniente tanto por orientación como por vistas, se pretendía que el patrimonio preexistente formara parte de la pared estructural de la vivienda.

Sin embargo, al proponer el proyecto en el ayuntamiento, se denegó, debido a un proyecto de ensanchamiento de vial para permitir el paso de vehículos en un futuro. Esto produjo que la parcela tuviera que realinearse y retirarse unos metros para tomar una nueva geometría lineal frente al trazado original del muro.

Que el muro original con sus atributos no pudiera ser utilizado, no quería decir que parte de los atributos del muro no pudieran ser reciclados. Además, también se pretendía mantener el carácter de continuidad urbana que generaba este muro. Todas estos conceptos enfatizan aún más la idea de construir una casa de muros que ocupe todo el frente de la parcela (Fig.43), abriéndose principalmente hacia el interior. (Fig.44)



Figura 401. Emplazamiento. Fuente: elaboración propia.



Figura 41. Muro original que rodeaba la parcela. Fuente: Revista Tectónica.

³⁶ Al Arquitectura Interior. (2020, octubre 14). Ciclo de historias mínimas. Invitado Josep Ricart Ulldemolins - H Arquitectes [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=MQpKUMVEGh8>

De esta forma los nuevos muros renacen de forma contemporánea a partir de materia tradicional ya existente, estableciendo una clara relación histórica y con el lugar.(Fig.42)

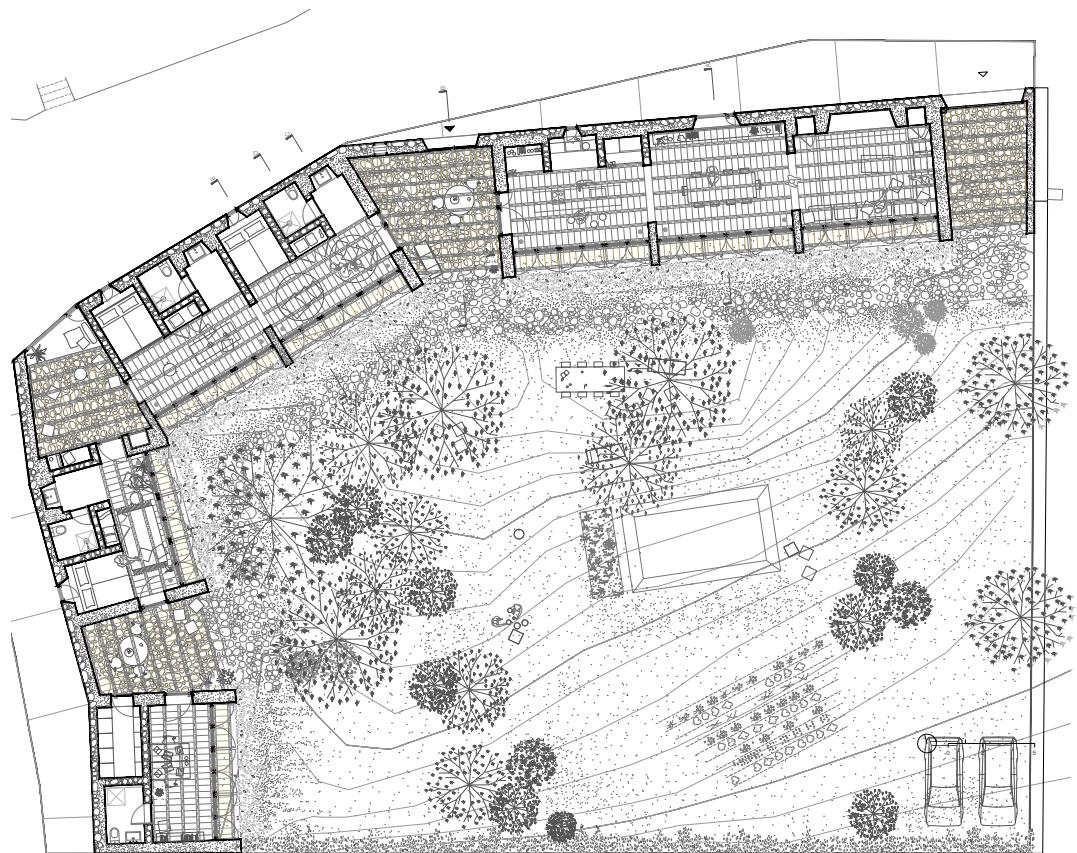


Figura 42. Planta general de la vivienda. Fuente: Revista Tectónica.



Figura 43. Imagen exterior de la vivienda. Fuente: Harquitectes.



Figura 44. Imagen desde el jardín. Fuente: Harquitectes.

El proceso de construcción se ejecutó generalmente como un muro de hormigón ciclópeo común(Fig.45), a excepción de dos particularidades que marcan la diferencia en este proyecto: el aglomerante del muro y la dosificación de las piedras.

Respecto al aglomerante, en lugar de usar cemento Portland, se utilizó un mortero de cal hidráulica mezclada con tierra del lugar, arena, grava y pequeñas partículas aislantes de vidrio reciclado.

Esta técnica constructiva, al ejecutarse por tongadas, permitió que la dosificación en los muros variara(Fig.49-52). De esta forma, dependiendo de la ubicación del muro (fachada al vial(Fig.48), interior(Fig.47), o exterior(Fig.46)), el tamaño de las piedras y la proporción respecto al mortero es diferente. Además, se repica la superficie en la cara exterior del hormigón de la fachada hacia el vial para hacer aflorar la piedra original, cumpliendo así con la normativa estética del ayuntamiento.



Figura 46. Aspecto del hormigón en fachada exterior hacia el jardín. Fuente: Harquitectes.



Figura 47. Aspecto del hormigón muro interior. Fuente: Harquitectes.



Figura 48. Aspecto del hormigón en muro hacia el vial. Fuente: Harquitectes.

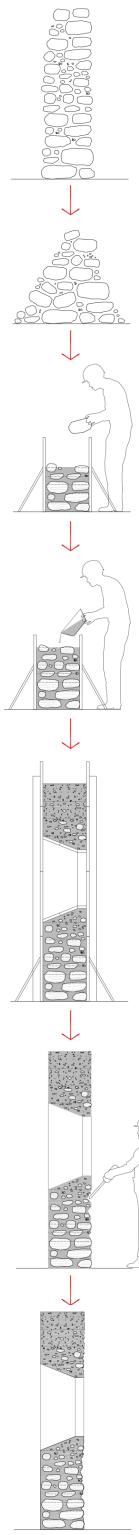
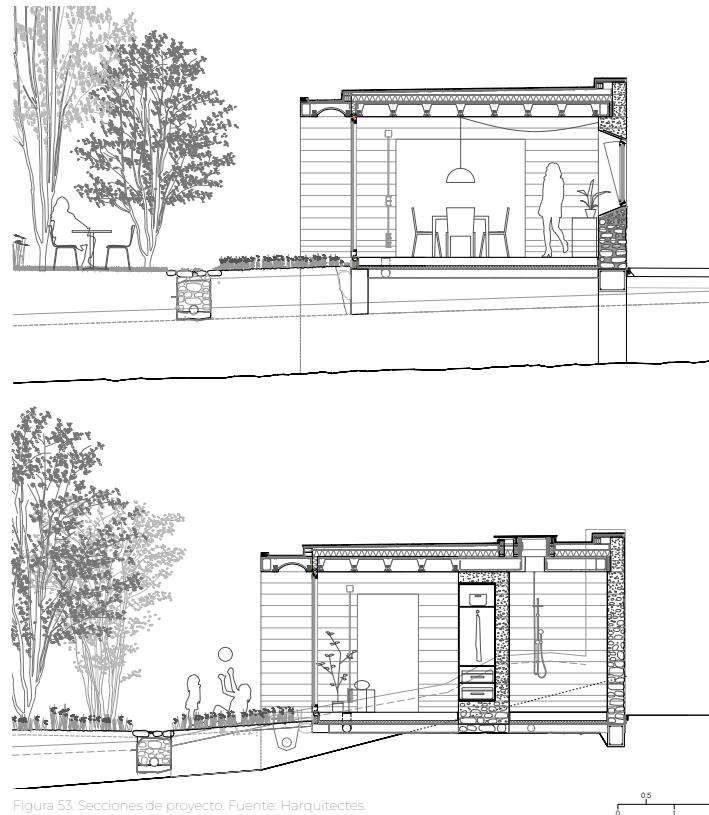


Figura 45. Proceso de construcción de los muros exteriores. Fuente: Harquitectes.



En este proyecto el muro lo es todo: no solo define la geometría de los espacios, sino que también determina la apariencia y la fachada. Además, desempeña un papel crucial en el cumplimiento de normativas específicas, tanto en términos estéticos establecidos por el ayuntamiento como en lo que respecta a las restricciones de transmitancia térmica impuestas por el Código Técnico, según el arquitecto Josep Ricart Ulldemolins.³⁶

Esta vivienda es un claro ejemplo de cómo la combinación de materiales tradicionales con técnicas e ideas constructivas contemporáneas puede dar lugar a un edificio más sostenible con el medio ambiente y los habitantes del mismo, además, se logra una potente identidad arquitectónica y arraigo con el lugar.



³⁶ Al Arquitectura Interior. (2020, octubre 14). Ciclo de historias mínimas Invitado Josep Ricart Ulldemolins - H Arquitectes [Video]. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=MQpKUmVEGh8>

HORMIGÓN RECICLADO

5.



Figura 55. Contenedor RDC.



Figura 56. Demolición de edificio.

5.1. Contexto

En la década de 1970, se dieron los primeros pasos en la investigación para evaluar las cualidades de resistencia y durabilidad de hormigones estructurales elaborados con agregados provenientes del reciclaje de hormigones desechados. Hasta entonces, su aplicación se había limitado en gran medida a la construcción de componentes que no estaban sujetos a cargas resistentes significativas. La adopción de esta novedosa técnica coincidió con el aumento del interés en el reciclaje de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (Fig.55), dado que este tema estaba estrechamente ligado a la conservación de recursos no renovables y a la reducción de la contaminación ambiental.³⁷

A los efectos del Código Estructural³⁸, el término árido reciclado se refiere a aquellos áridos obtenidos como producto de una operación de reciclado de residuos de hormigón, permitiéndose únicamente la utilización de árido grueso reciclado.

Para su aplicación en hormigón estructural, el Código Estructural no contempla porcentajes de sustitución superiores al 20% sobre el contenido total de árido grueso. Por encima de este valor será necesario la realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación, que deberá ser aprobada por la Dirección Facultativa. Actualmente, la normativa que aborda las características y especificaciones de los áridos utilizados en la fabricación del hormigón, incluyendo aquellos que provienen de fuentes recicladas, es la Norma Europea EN 12620:2002+A1:2008.

5.2. Marco normativo y aplicaciones

En España, la producción de hormigón utilizando áridos reciclados tuvo sus inicios a raíz de las experiencias previas en otras naciones de la Unión Europea con una destacada trayectoria del reciclaje, como Alemania y Holanda. No obstante, el factor crucial que impulsó el inicio de las obras y proyectos en España que emplean hormigones reciclados fue la publicación del Anexo 15 del EHE 2008³⁹, en el cual se establecen las directrices pertinentes para la aplicación del hormigón reciclado.

Según el Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción realizado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)⁴⁰, las aplicaciones más comunes del hormigón reciclado en España son:

- Obras de tierra y terraplenes (Fig.57)

Es necesario considerar la uniformidad del residuo, así como asegurarse de que esté libre de armaduras, sustancias contaminantes y cumpla con ciertos requisitos de granulometría.

Aprovechar estos escombros "limpios" en terraplenes podría limitar las oportunidades que estos materiales ofrecen. En caso de optar por utilizarlos en obras de tierra, se procedería como si fueran materiales naturales.

- Carreteras (Fig.58)

Es factible incluir áridos reciclados derivados de hormigón en la construcción de carreteras, siempre y cuando se satisfagan los requisitos técnicos y ambientales establecidos.

En España las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de áridos reciclados en la construcción de capas de firmes de carreteras se encuentran esencialmente recogidas dentro de la normativa UNE-EN, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), y el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4).

- Edificación y obra pública

Las principales aplicaciones en edificaciones de los áridos derivados de la trituración de hormigón incluyen su uso como árido grueso para hormigones, árido fino para morteros y como finos en la producción de cemento.

En términos generales, estos áridos gruesos pueden ser empleados tanto para hormigón en masa como para hormigón armado, siguiendo las pautas de dosificación de los hormigones convencionales.

En el caso de que el hormigón reciclado cumpla función estructural, deberá cumplir ciertas especificaciones establecidas por el Código Estructural.



Figura 57. Construcción de terraplén.



Figura 58. Construcción de carretera.

La utilización de árido reciclado procedente de hormigón en hormigón estructural está incluida en el Apartado 30.8 de la EHE³⁸, y establece unas limitaciones al uso del árido reciclado, cuyas líneas generales se señalan a continuación:

- Para la aplicación de áridos reciclados en hormigón estructural, el Código Estructural no contempla porcentajes de sustitución superiores al 20% en peso sobre el contenido total del árido, contemplándose únicamente la utilización de la fracción gruesa de árido reciclado.

- La utilización del árido reciclado se encuentra limitada a el uso de hormigón en masa y armado siempre y cuando la resistencia característica no supere los 40 N/mm², quedando excluido su empleo en hormigón pretensado.

- Deberán excluirse los áridos reciclados procedentes de hormigones especiales (aluminoso, con fibras, con polímeros, etc) o con patologías (ataque por sulfatos, fuego, etc)

37. Zega, C., Sosa, M., & Maio, Á. (2018). Hormigones con Agregados Reciclados.

38. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). Código Estructural.

39. Ministerio de Fomento. (2008). Anexo 15: Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. En Código Estructural.

40. Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción realizado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Recuperado de <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construcción-y-demolición/valorización/propiedades-del-material-procesado/2021/árido-reciclado-procedente-de-hormigón.html>

En la tabla 8 se recogen las especificaciones que deben requerirse al árido reciclado en comparación con el árido no reciclado (natural).

	Árido reciclado	Árido natural	Límite árido mezcla (20% AR+80%AN)
Absorción	≤7%	≤4,5%	≤5%
Terrenos de arcilla	≤0,6%	≤0,16%	≤0,25%
Impurezas			
Ladrillo	≤5%	-	≤1%
Asfalto	≤1%	-	≤0,2%
Otras impurezas (Plástico, vidrio, papel, etc)	≤1%	-	≤0,2%

Tabla 8. Especificaciones del árido natural y el árido reciclado. Fuente: Utilización de árido reciclado grueso de hormigón para la fabricación de hormigones estructurales, SECECSA y MITMA.

5.3. Composición y obtención de materias

Según la Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición, la casi totalidad de los áridos reciclados que se producen en España (así como en los otros países europeos) son materiales mixtos formados en proporciones variables de hormigón triturado, piedra sin mortero adherido, materiales cerámicos y de obra de fábrica, asfalto y otros materiales de origen pétreo.⁴¹

El proceso de reciclaje de hormigones para obtener estos agregados se lleva a cabo mediante una serie de pasos planificados para producir un material comparable a los agregados naturales obtenidos por medio de la trituración. Este proceso engloba fases como la preclasificación, el proceso de trituración y, por último, la clasificación final del material. (Fig.59)

Las instalaciones destinadas a la producción de agregados reciclados están diseñadas con una estructura y equipamiento análogos a los utilizados en las plantas de procesamiento de agregados naturales comunes (Fig.60). La complejidad del proceso de reciclado depende del grado de contaminación presente en el material original y del uso previsto para el agregado reciclado resultante. Estas instalaciones están formadas por trituradoras, sistemas de separación y medios de transporte. Cuando se trata de hormigones obtenidos de estructuras que contienen refuerzos de acero, resulta fundamental llevar a cabo una fase preliminar de eliminación de componentes metálicos antes de continuar con los procesos de trituración y clasificación del material.

Respecto al almacenamiento de los agregados reciclados, el método más conveniente es clasificar su almacenaje considerando las diversas calidades de los hormigones de los cuales se derivan los áridos reciclados. Sin embargo, este enfoque puede presentar dificultades, ya que en la mayoría de los casos no se dispone de información acerca de su origen.



Figura 59. Proceso de producción del árido reciclado. Fuente: Salmedina.

41. Proyecto GEAR (2018). Guía Española de Áridos Reciclados. Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición

Una alternativa viable a este sistema de clasificación es almacenar los agregados de manera independiente según su tamaño. Esto es posible debido a que durante el proceso de trituración se obtienen agregados con una amplia diversidad de tamaños de partículas, categorizándose generalmente en agregados gruesos o finos.

Según el Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción realizado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)⁴⁰, las propiedades del hormigón reciclado son las siguientes:

-Necesidades de agua y cemento: En el proceso de mezclado del hormigón fresco reciclado, se requiere una cantidad mayor de agua en comparación con el hormigón convencional. Además, para lograr una resistencia ligeramente superior, es necesario un ligero aumento en el consumo de cemento.

-Densidad del hormigón reciclado: La densidad del hormigón puede llegar a disminuir entre un 10% y un 20% cuando se reemplaza el árido grueso por árido reciclado en un porcentaje significativo.

-Resistencia a la compresión: la sustitución de parte del árido convencional por árido reciclado en el hormigón generalmente no afecta de manera significativa a la resistencia a compresión. Sin embargo, si se reemplaza la totalidad del árido grueso por árido reciclado, la resistencia a la compresión podría disminuir en un rango de entre el 10 y 20%.

-Módulo de elasticidad: en el caso de hormigón reciclado, el módulo de elasticidad es consistentemente menor que el hormigón convencional. La disminución de este valor puede variar entre un 15% y un 40%, y esta diferencia es aún más notable cuando se utiliza árido fino reciclado junto con el grueso.

-Retracción⁽⁸⁾ y fluencia⁽⁹⁾: estos fenómenos que ocurren en el hormigón con el paso del tiempo, cuando se sustituye una parte del árido por árido reciclado (menos del 20% del grueso), permanecen estables. Sin embargo, si se reemplaza el 100% del árido grueso, la retracción podría aumentar hasta un 50% y la fluencia podría incrementarse entre un 30% y un 60%.

-Absorción y porosidad: la proporción de árido reciclado en el hormigón también afecta la absorción de agua y porosidad del material. En comparación con el hormigón convencional, el hormigón con árido reciclado tiende a tener una mayor absorción y porosidad.

-Propagación de la carbonatación⁽¹⁰⁾: la porosidad más alta del árido reciclado puede promover la propagación de la carbonatación en el hormigón.



Figura 60. Planta de reciclaje de escombros y gestión de residuos.

40. Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción realizado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Recuperado de: <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construcción-y-demolición/valorización/propiedades-del-material-procesado/2022/árido-reciclado-procedente-de-hormigón.html>

(8) Retracción: fenómeno que ocurre durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, en el cual el material experimenta una reducción de su volumen.

(9) Fluencia: fenómeno en el que el material experimenta deformaciones lentes y continuas bajo carga constante a lo largo del tiempo.

(10) Carbonatación: proceso en el cual el CO₂ del aire penetra en el hormigón y reacciona con el hidróxido de calcio, formando carbonato de calcio y reduciendo el pH, pudiendo causar la corrosión de las armaduras.

Sin embargo, el contenido de cemento en el árido reciclado también aporta alcalinidad, lo que puede contrarrestar parcialmente este efecto al dificultar la penetración del CO₂ hacia el interior del hormigón.

-Restricciones de cloruros y SO₃: para garantizar la calidad y durabilidad del hormigón reciclado, es necesario que los áridos reciclados cumplan con restricciones en cuanto al contenido de cloruros y sulfatos. Estas restricciones son similares a las establecidas para los áridos convencionales y están diseñadas para prevenir la corrosión de las armaduras.

5. 6. Investigación: Combinación de ACV e Índice de Circularidad para la evaluación de impacto ambiental del hormigón reciclado

Existen múltiples investigaciones que analizan la comparación entre el hormigón reciclado y el convencional. En concreto en este estudio llevado a cabo por A. Kadawo, M. Sadagopan, O. During, K. Bolton y A. Nagy, en 2022 en Suecia ⁴², se presenta una novedad al combinar un análisis ACV y el índice de circularidad.

El propósito de este estudio es combinar el ACV con el índice de circularidad para evaluar tanto los impactos ambientales como la circularidad del producto. Se compara un hormigón convencional de referencia, denominado RC (reference concrete), con unos hormigones que tienen el 50 %, RAC50 (recycled aggregate concrete) y el 100 %, RAC100, de sus agregados reemplazados por áridos de hormigón reciclado. La composición de los hormigones tienen la misma cantidad de cemento, agua y aditivos. (Tabla 9) Se analizan los hormigones reciclados en dos situaciones diferentes, explicadas más adelante.

Material	RC (kg/m ³)	RAC50 (kg/m ³)	RAC100 (kg/m ³)
Cemento	490	490	490
Agua	245	245	245
RCA 0/4	-	-	315
RCA 0.5/4	-	-	550
RCA 8/11.2	-	-	707
RCA 0/8	-	845	-
Arena natural 0/8 mm	845	-	-
Roca triturada 8/11.2 mm	729	729	-
Aditivo (0.75% peso del cemento)	37	37	37

Tabla 9. Componentes de cada mezcla de hormigón. Fuente: cita 42.

DIAGRAMA DE FLUJO Y RECOPILACIÓN DE DATOS: Una vez enmarcado el ámbito de estudio, se recopilan datos relevantes para la investigación y se elaboran diagramas de flujo de cada escenario para comprender de manera gráfica el proceso de producción. (Figuras C-F del Anexo)

Los datos relacionados con los impactos ambientales asociados al proceso de extracción de materias primas

42. Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

naturales se obtienen a partir de la Declaración Ambiental de cada producto (DAP). En el caso de que esta información no esté disponible, se toman de la base de datos Ecoinvent 3.0, proporcionando unos datos de promedio global a modo de estimación general de los efectos ambientales del producto.

Debido a la semejanza entre el proceso de trituración y clasificación de los residuos de hormigón y el proceso de trituración de piedra, el estudio utiliza información relativa a la trituración de piedra como referencia para evaluar los impactos ambientales asociados con la producción de áridos reciclados.

Además, con el fin de obtener una evaluación más precisa y evitar duplicar los impactos ambientales en el cálculo, se aplica una regla de corte. Esta regla establece un límite a partir del cual los impactos ambientales derivados de la producción inicial del hormigón no son contabilizados nuevamente al evaluar la producción de áridos de hormigón reciclados.

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA: El objetivo de este ACV es comparar el impacto ambiental entre RC, RAC50 y RAC100, focalizando en las etapas de producción de los materiales y su transporte. Estas fases representan las etapas de producto A1, A2 según norma UNE-EN 15978⁴³. (Fig.6)

Dentro de esta análisis, se estudian diversas categorías de impacto, incluyendo el potencial de calentamiento global (GWP), el potencial de agotamiento del ozono (ODP), el potencial de acidificación (AP), el potencial de eutrofización (EP), el potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP) y el potencial de agotamiento de recursos abióticos ⁴⁴ (ADP).

DEFINICIÓN DE ESCENARIOS: En el escenario 1, los residuos de hormigón se transportan a una planta de trituración de áridos reciclados, después estos áridos se llevan de vuelta a la obra. Se estima que 1m³ de residuos de hormigón genera 0,62m³ de RCA, en consecuencia se utiliza un factor de recuperación de 0,62 para determinar la cantidad de residuos requerida para producir las cantidades necesaria. Estos escenarios se denominarán RAC100-1 y RAC50-1.

En el escenario 2, se instala en obra una planta de trituración móvil, evitando el transporte de los residuos y el RCA. El uso de esta planta móvil solo es rentable para triturar grandes cantidades de residuos, al menos 30.000 toneladas. Estos escenarios se denominarán RAC100-2 y RAC50-2.

INDICADOR DE CIRCULARIDAD: La evaluación de la circularidad requiere un método que no está estandarizado, por lo tanto, se lleva a cabo una revisión de diferentes índices de circularidad empleados en productos similares. Este indicador, designado como "c", se basa en la valoración económica de los materiales contenidos en el producto.

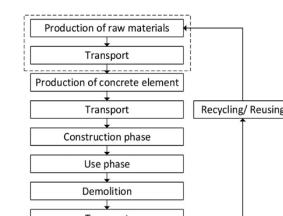


Figura 61. Diagrama de flujo general del hormigón. Fuente: cita 42.

43. Asociación Española de Normalización. (2012). UNE-EN 15978:2012. Evaluación del ciclo de vida de los edificios y estructuras de construcción. Principios generales.

44. Recursos abióticos: los componentes abióticos de un sistema, como el suelo, el agua, el aire, la luz solar, los minerales y la temperatura, son elementos no vivos que influyen en los seres vivos del ecosistema.

Para ilustrar cómo se aplica este concepto, se crea un “árbol de productos”⁽⁸⁾ específico para el caso de RAC100 (Figura G del Anexo), demostrando cómo el valor económico se deriva de los materiales que componen el producto. Este enfoque adapta una perspectiva que parte de lo particular hacia lo general, donde los costes generados por el procesado de los materiales se identifican como “valor de actividades” (Δv). Con cada etapa de procesamiento del material, se obtiene un nuevo valor que se suma al valor original “v”, resultando en un nuevo valor (nuevo valor = $v + \Delta v$).

$$C_{RAC} = C_1 \times \frac{V_1}{V_{total}} + C_2 \times \frac{V_2}{V_{total}} + C_3 \times \frac{V_3}{V_{total}} + C_4 \times \frac{V_4}{V_{total}}$$

donde $V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \Delta V_{total}$

$$V_3 = (V_{3,1} + \Delta V_{3,1}) + (V_{3,2} + \Delta V_{3,2}) + (V_{3,3} + \Delta V_{3,3})$$

RESULTADOS: Desde el punto de vista logístico, el escenario 1 es considerado el idóneo para una cantidad moderada y pequeña de residuos de hormigón que se transportarán para su trituración, como en el caso de RAC50. Sin embargo el escenario 2 es más adecuado para la producción de RAC100, ya que la trituradora móvil requiere un suministro continuo de residuos de hormigón.

Respecto a los impactos ambientales de RAC50 y RAC100, se puede observar en la Figura 62 que en las categorías de potencial de calentamiento global (GWP) y potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP), los impactos son similares a los impactos del hormigón convencional. Sin embargo, las diferencias significativas entre las alternativas RAC y hormigón estándar se evidencian principalmente en la categoría de potencial de agotamiento del ozono (ODP).

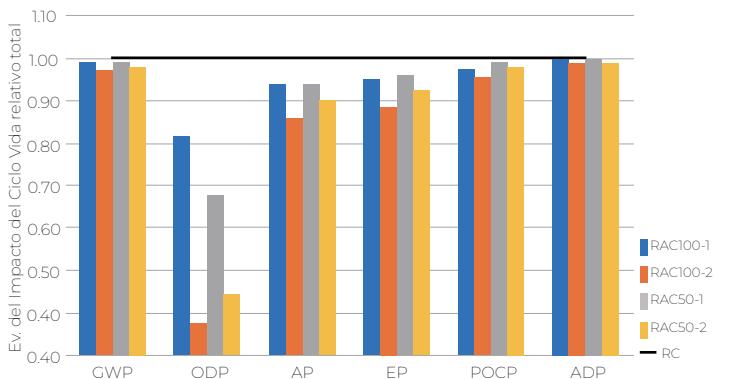


Figura 62. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida total de RAC100-1, RAC100-2, RAC50-1 y RAC50-2 expresado en relación con RC. Fuente: cita 42.

(8) Árbol de productos: también conocido como estructura de desglose del producto (EDP), es una representación jerárquica de un producto o proyecto que descompone el producto en sus componentes más pequeños y detallados.

En términos generales, se observó que las alternativas de RAC independientes de los escenarios tienen un menor impacto total en todas las categorías, especialmente cuando las distancias de transporte son mínimas, como en el escenario 2, ya que en esta situación se evita el transporte de residuos

de hormigón y RCA. Sin embargo, se ha demostrado que el uso de una planta de trituración móvil solo es ecológicamente viable para triturar grandes cantidades de residuos.

Tanto el hormigón de referencia como las alternativas de hormigón reciclado (RAC, *recycled aggregate concrete*) mantienen la misma relación agua-cemento. Esto implica que la reducción de los impactos ambientales observada en los RAC en comparación con el hormigón de referencia surge principalmente de las actividades de transporte adicionales, que se ven en la Figura 63 y 64 para las categorías de potencial de calentamiento global (GWP) y potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP). Por lo tanto, la sustitución de RCA en ambos escenarios conlleva una reducción en la contribución de los agregados a los impactos ambientales GWP y ADP. Esto se interpreta como una reducción en las emisiones de CO_2 y una menor extracción de materia prima, lo que favorecen la conservación del entorno natural.

Las figuras 65 y 66 muestran la contribución de los agregados y el transporte en los diferentes escenarios de RAC100 y RAC50, comparados con la contribución de RC. En todas las categorías las alternativas RAC muestran menor impacto ambiental, siendo RAC100 la mejor alternativa.

Aunque no sea la premisa principal de este estudio, se evidencia que el cemento es el responsable de más del 90% del impacto ambiental de las categorías evaluadas, especialmente en lo que respecta al potencial de calentamiento global. La opción de sustituir una parte del cemento por materiales secundarios como vidrio o escoria podría conllevar una disminución de al menos el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero al remplazar al menos el 30% del cemento⁴⁴, lo que tendría un efecto positivo en los aspectos ambientales y de circularidad.

La combinación de ACV junto con el índice de circularidad puede ayudar a optimizar las soluciones de reciclaje, especialmente en términos de logística, dado que las fases de ACV se ven fuertemente influenciadas por el transporte. Cada incremento en el índice de circularidad, conlleva un efecto beneficioso en el medio ambiente, ya que implica una reducción en la extracción de materiales, menos generación de residuos y menor uso de vertederos.

A continuación, se presentará un caso práctico de una vivienda construida con hormigón reciclado, ilustrando como estos principios teóricos se aplican en proyectos reales para lograr construcciones más sostenibles.

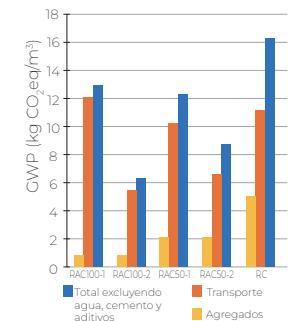


Figura 63. Contribución de los agregados y el transporte en el potencial de calentamiento global. Fuente: cita 42.

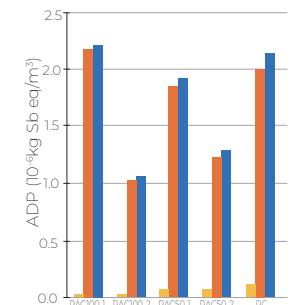


Figura 64. Contribución de los agregados y el transporte en el potencial de agotamiento de los recursos abióticos. Fuente: cita 42.

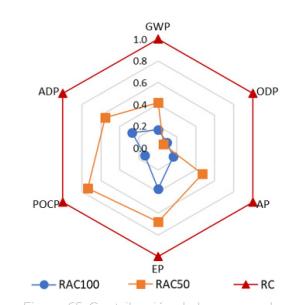


Figura 65. Contribución de los agregados a los impactos. Fuente: cita 42.

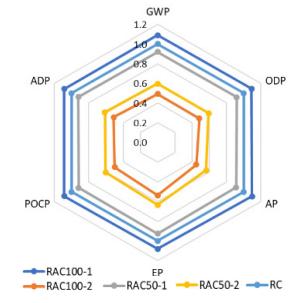


Figura 66. Contribución del transporte. Fuente: cita 42.

44. Sadagopan, M., Malaga, K., Lundin, M., & Nagy, A. (2021). Effects of Slag Addition and Mechanical Pre-Processing on the Properties of Recycled Concrete in Terms of Compressive Strength and Workability. Nordic Concrete Research, 64.

5.7. Caso de estudio: Cloister House, MORQ



Figura 67. Cloister House desde el exterior

Según la descripción proporcionada por el estudio italiano⁴⁵, los clientes de esta vivienda unifamiliar acudieron a MORQ en busca de un refugio que habitar de forma pausada y relajada en Floreat, un suburbio residencial de la ciudad de Perth (Australia). Sin embargo, al llegar al emplazamiento, los arquitectos se encontraron una parcela resultante de la división ortogonal de una manzana, haciendo frente a una carretera con mucho tránsito rodado, rodeada de un entorno totalmente densificado, poco destacado y sin vegetación, estas características no representaban un lugar de descanso tal y como buscaban los clientes.(Fig.67.1.)



Figura 67.1. Ubicación del proyecto. Fuente: elaboración propia.

En respuesta a la necesidad de privacidad y tranquilidad frente al paisaje suburbano circundante, los arquitectos decidieron que la vivienda debía ser un espacio cerrado y orientado hacia el interior.(Fig.68) Al darle la espalda a la calle se logra aislar la vivienda de los ruidos exteriores, creando así un santuario en el interior.

Completada en 2018, esta casa, denominada "Cloister House" (Casa Enclaustro), no hace referencia tanto a un claustro en términos tipológicos si no como a la idea de creación de un mundo interno y protegido. El corazón de esta vivienda es el patio, que organiza el programa, enmarca la rutina de los habitantes, distribuye la luz y facilita la ventilación. Este patio cumple con el objetivo de renegar cualquier indicio del contexto suburbano del lugar.

La distribución de la vivienda se divide en dos: una zona para el matrimonio propietario de la vivienda, y la segunda zona para invitados, o los hijos, quienes les visitan esporádicamente. Con una clara jerarquía, el área para el matrimonio se organiza alrededor del patio central, mientras que la otra zona se ubica en la parte trasera de la casa. Esta distribución permite que los recorridos diarios del matrimonio estén continuamente enmarcados por el patio central.(Fig.69)



Figura 68. Acceso a la vivienda. Fuente: MORQ.

45. MORQ. (2018). Cloister House. Recuperado de <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

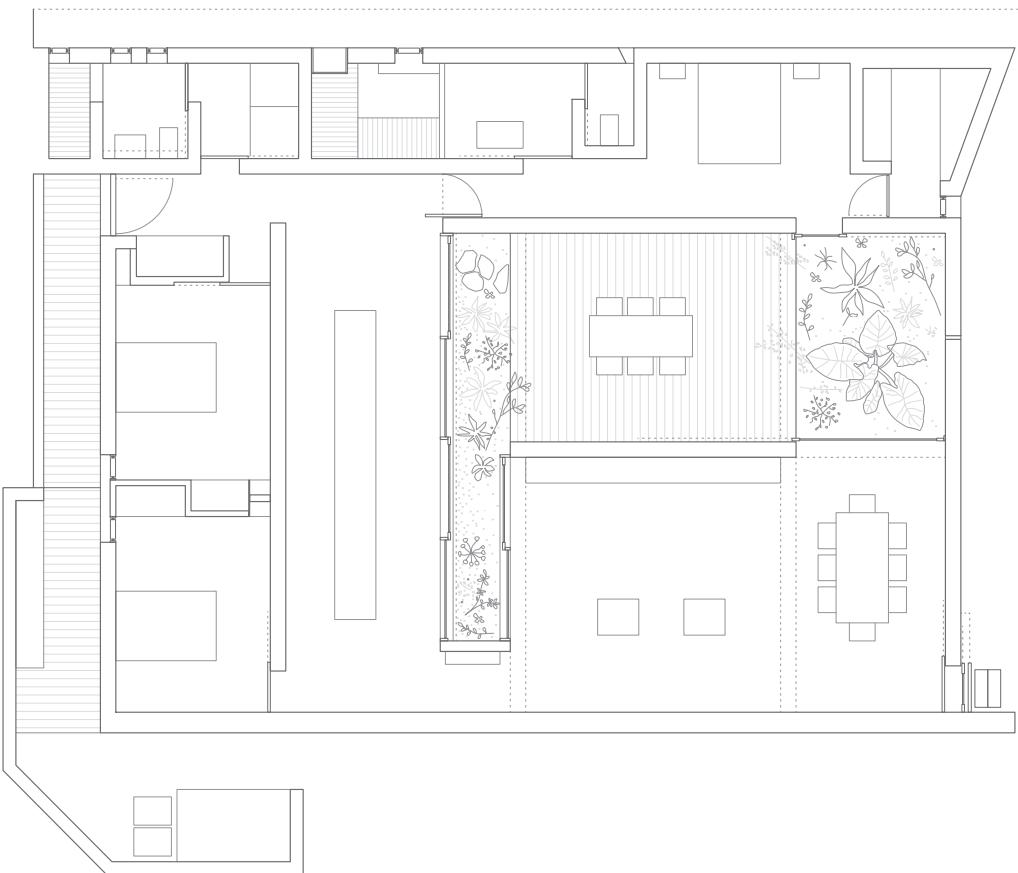


Figura 69. Planta general de la vivienda. Fuente: MORQ.

La vivienda incorpora diversas soluciones ambientales^{45.1} que dan respuesta a los desafíos climáticos de Perth, destacando la protección contra los fuertes vientos y el intenso sol. El patio(Fig.70) actúa como mediador de la luz solar y facilita una ventilación cruzada constante, extrayendo el calor de la casa durante los meses más cálidos, además, gracias a la gran cantidad de vegetación se consigue humectar el aire que entra en la vivienda, logrando disminuir notablemente la temperatura en verano. Los materiales utilizados tanto en muros como en suelos contribuyen aún más al confort térmico de la vivienda, ya que al estar construidos en hormigón, poseen mucha inercia térmica, generando mayor confort y eficiencia energética.

La elección de materiales para este proyecto sigue la filosofía del estudio, buscando aquellos que cuentan una historia, los que reflejan el paso del tiempo y poseen una sensación y textura naturales. Los arquitectos buscaban un aspecto de la vivienda de presencia y atemporalidad, que fuese capaz de resistir el paso del tiempo.

45.1. MORQ. Architecture & Joe Rollo. (2020,May). Cloister House. Perth, Australia: Cement, Concrete & Aggregates Australia, (33), ISN 1833-0975.

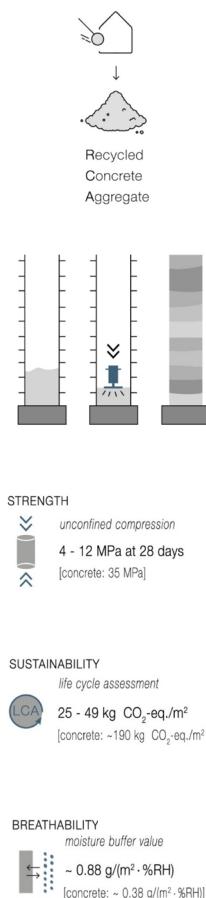


Figura 70. Patio de la vivienda. Fuente: MORQ.

Los muros estructurales se realizan con hormigón reciclado apisonado construidos utilizando la antigua técnica del “pisé” (Fig.71), también denominada hormigón por tongadas, además, se mezcla con óxido de acero reciclado, lo que da un tono cálido a los muros en el interior (Fig.72). Al combinar esta técnica junto con el hormigón formado por áridos reciclados, se consigue que los muros estructurales tengan mayor resistencia a compresión, menor emisión de CO₂, y mayor transpirabilidad a la humedad.⁴⁶ Además, esta técnica aporta la consistencia estructural suficiente a los muros para prescindir de armaduras de acero.

Observando el aspecto de los muros, podría deducirse una proporción en la mezcla de 30% de arena, 10% de cemento, 60% de grava, siendo el tamaño de esta grava entre 4 y 10 mm.⁴⁷



Figura 71. Proceso y propiedades de muro construido con áridos reciclados y técnica pisé. Fuente: cita 46.

46. Arrigoni, A., Beckett, C. T. S., Ciancio, D., Pelosiato, R., Dotelli, G., & Grillet, A.-C. (2018). Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 11-20.

47. Palmgren, M. (2022). Rammed Concrete [Tesis, KTH Royal Institute of Technology]. Architecture and Daylight Studio.

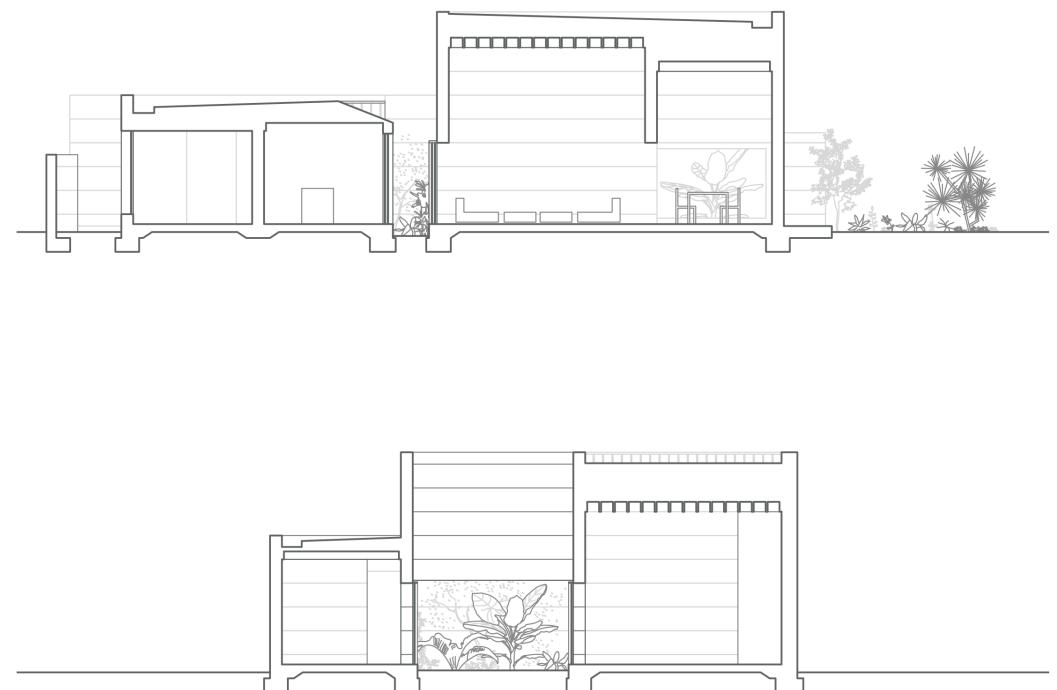


Figura 73. Secciones generales del proyecto. Fuente: MORQ.

La filosofía de los arquitectos tiene mucho que ver con la elección de un material reciclado, ya que para ellos el concepto de continuidad temporal y permanencia es esencial. Esta vivienda es la conjunción de un concepto antiguo, la tipología de claustro, para ofrecer una respuesta innovadora. No se deja llevar por la generación de formas innecesarias, sino que se basa en la materialidad, potenciando la esencia de la materia. Este enfoque contribuye a generar una sensación de refugio puro, completando así el concepto del proyecto y mejorando la vida de los propietarios.



Figura 74. Vivienda habitada. Fuente: Video en The Local Project.

NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.

En la búsqueda constante por mejorar y adaptar los materiales de construcción a las demandas cambiantes de la sociedad y el medio ambiente, las investigaciones en el campo del hormigón desempeñan un papel crucial. En este apartado, se muestran algunas de las nuevas investigaciones y desarrollos que están marcando el camino hacia un hormigón más resistente, duradero y sostenible.

6.1. Bio-hormigón



Figura 75. Aspecto interior del hormigón.
Fuente: Universidad Técnica de Delft.

Cuando el hormigón está sometido a tensiones o durante el proceso de fraguado y endurecimiento, es susceptible a desarrollar grietas en su superficie. La formación de grietas es más común en climas cálidos, ya que su principal causa es debido a la rápida evaporación del agua en la superficie del hormigón. Una vez que el hormigón ha completado el proceso de fraguado, comienza la etapa de endurecimiento. Durante los primeros días de este proceso, el hormigón presenta una resistencia muy baja, especialmente a tensión, lo que lo hace susceptible a agrietarse.

Si estas grietas se vuelven demasiado grandes, pueden dar lugar a la corrosión de las armaduras de acero presentes en el interior del hormigón, o incluso a reacciones químicas no deseables en el material. Esto no solo afecta negativamente la apariencia estética del hormigón, sino que también compromete las propiedades mecánicas de la estructura, reduciendo así la vida útil de las estructuras de hormigón.

Para prevenir que las grietas se vuelven excesivamente grandes, los ingenieros suelen incorporar una cantidad mayor de armaduras de acero de la necesaria en las estructuras del hormigón. Sin embargo, este acero adicional no tiene un propósito estructural y aumenta los costes de la construcción. Otra opción para lidiar con las grietas es repararlas, pero este proceso puede ser complejo y costoso mediante métodos convencionales. Ninguna de estas opciones parece ser la más idónea, por esta razón, un equipo de expertos de la Universidad Técnica de Delft (TU Delft) se embarcó en una investigación para encontrar una alternativa más efectiva y duradera. Tras un periodo de nueve años, presentan los avances logrados de un prototipo de hormigón de auroreparación, o "Self-healing Concrete". Este logro innovador se ha conseguido mediante la incorporación de bacterias en la composición del hormigón, lo que confiere a este material la capacidad de repararse a sí mismo.

Según el artículo "Self healing concrete-materials that can repair itself"⁴⁸ publicado por la Universidad Técnica de Delft, el agente regenerativo que se incluye en la mezcla de hormigón, consta de dos componentes: esporas del género Bacilos en y nutrientes de lactato de calcio.

48. Universidad Técnica de Delft. Self-healing concrete: Materials that can repair itself. Recuperado de <https://www.tudelft.nl/innovatie-impact/samenwerken-met-tu-delft/octrooien/selectie-van-tu-delft-patent-portfolio/self-healing-concrete-materials-that-can-repair-itself>

Las esporas bacterianas y los nutrientes están protegidos por cápsulas biodegradables formadas por un aglutinante para aumentar el potencial de viabilidad a largo plazo de las esporas bacterianas, de esta forma, estas pueden permanecer inactivas durante 200 años.⁴⁹

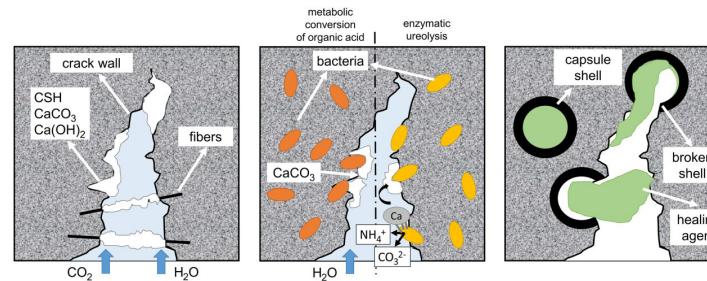


Figura 76. Proceso de regeneración. Fuente: Artículo Self Healing Concrete por Yas Associates en LinkedIn.

La proporción de este aglutinante en la composición de la mezcla es del 1%, lo que significa que el agente curativo está formado por el 95-99% de materiales funcionales. Así, el volumen total del agente regenerativo en la mezcla del hormigón puede limitarse al 1% del volumen total del hormigón y al 4% de la masa del cemento.⁵⁰ Este agente regenerativo es incorporado al hormigón durante el proceso de mezcla.

Cuando, años después, comienzan a formarse grietas en el hormigón, el agua penetrará y abrirá los gránulos incorporados en la mezcla. Las bacterias presentes germinarán y comenzarán a utilizar el lactato como fuente de alimento. Esta actividad biológica permitirá que el calcio se combine con los iones de carbonato generados, dando lugar a la formación de calcita o piedra caliza.⁴⁸ Una vez que el proceso de sellado haya concluido, lo cual puede durar alrededor de cuatro semanas según el estudio realizado por TU Delft⁵¹, los agentes regenerativos recuperarán su actividad inicial. Esta técnica innovadora ofrece la posibilidad de cerrar fisuras de diversas longitudes, si bien no es capaz de tratar con aquellas que superen los 0.8 mm de ancho.

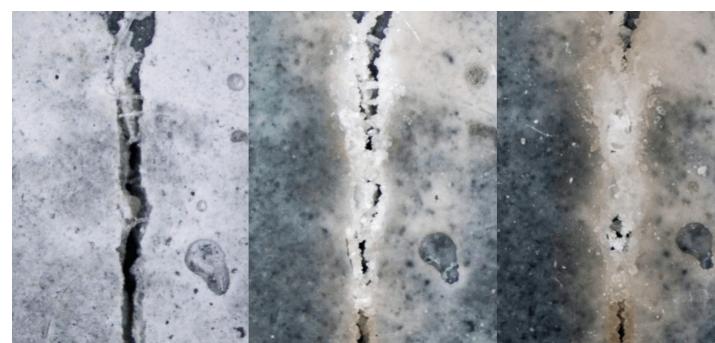


Figura 77. Aspecto de una grieta reparada. Fuente: Universidad Técnica de Delft.

49. Inarquia. Hormigón autorreparable: ¿Qué es y cómo funciona? Recuperado de <https://inarquia.es/hormigon-autorreparable-que-es-como-funciona/>

50. Jonkers, H. M., & Mors, R. (2012). Full scale application of bacteria-based self-healing concrete for repair purposes. En *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III: 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*

51. Md Yunus, B., Schlangen, E., & Jonkers, H. M. (2019). Bio-Based self-healing mortar. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(9), 247-254.

6.2. Grafeno como aditivo



Figura 78. Representación del grafeno.
Fuente: Products PCC.

El grafeno es un nanomaterial⁵¹ compuesto de carbono puro en el que los átomos de carbono se organizan en una sola capa que posee un grosor de apenas un átomo.(Fig.78) Dado que el carbono es el elemento fundamental en la química de la vida en la Tierra, el grafeno posee un potencial significativo como una alternativa ecológica y sostenible para diversas aplicaciones, incluyendo la industria de la construcción.⁵² Una de las características más impresionantes del grafeno es su resistencia mecánica. Con una resistencia a tracción de 130 GPa, es más fuerte que cualquier otro material conocido, incluyendo el acero. Esto significa que puede soportar tensiones extremadamente altas sin romperse. Además, su módulo de Young de 1 TPa demuestra su capacidad para mantener su forma bajo cargas y deformaciones considerables.⁵³



Figura 79. Prueba de impermeabilidad.
Fuente: UCAM.

Una investigación realizada por Sejal P. Dalal, Purvang Dalal⁵², se enfoca en evaluar cómo la adición de grafeno al hormigón pudo influir en las propiedades del hormigón, en concreto en términos de resistencia y durabilidad. Para llevar a cabo este estudio, se realizaron varias mezclas de hormigón utilizando distintas dosis de grafeno disperso en agua, variando desde 0,5 g/l hasta 1 g/l.

Los resultados obtenidos revelaron mejoras significativas en la resistencia del hormigón cuando se añadió 1 g/l de grafeno, con aumento del 95% en la resistencia a flexión, 55% en la resistencia a tracción y 27% en la resistencia a compresión.

Además, tras un estudio realizado por la Universidad Católica de Murcia junto con la empresa Graphenano⁵⁴, demostró que con una adecuada proporción de grafeno en la mezcla, es posible hacer un hormigón con un grado de impermeabilidad elevado.(Fig.79)

Asimismo, se ha destacado la contribución potencialmente sostenible del grafeno al hormigón. La inclusión de este nanomaterial puede reducir en un 50% la cantidad de hormigón necesaria sin comprometer la seguridad estructural. Esto a su vez, tiene un efecto significativo en la disminución de las emisiones de carbono asociadas a la producción de cemento, en concreto se estima que esta reducción en el consumo de materiales podría llevar a una disminución de 446 kg de emisiones de carbono por cada tonelada de cemento producido.⁵⁵

(8) *Nanomaterial*: cualquier material que tenga al menos una dimensión en el rango de nanómetros, lo que significa que su tamaño está en la escala de nanómetros, donde 1 nanómetro equivale a una mil millonésima parte de metro.

52. Dalal, S. P., & Dalal, P. (2021). Experimental investigation on strength and durability of graphene nanoengineered concrete. *Construction and Building Materials*, 276, 122236.

53. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, 321(5887), 385-388.

54. Universidad Católica San Antonio de Murcia. (2016, febrero). *Graphenano y la UCAM demuestran la eficiencia energética del grafeno aplicada al hormigón*. <https://www.ucam.edu/noticias/graphenano-y-la-ucam-demuestran-la-eficiencia-del-grafeno-aplicada-al-hormigon>

55. Fayyad, T., Abdalqader, A., & Sonebi, M. (2022). An insight into graphene as an additive for the use in concrete. En Civil Engineering Research Association of Ireland Conference 2022 (CERA 2022): Proceedings (CERA Proceedings).

CONCLUSIÓN

7.

Lo primero que puede observarse tras este estudio, es la disparidad entre la información disponible entre las técnicas elegidas. Mientras que el hormigón reciclado ha sido ampliamente estudiado y probado, el hormigón ciclópeo carece de suficiente investigación y regulación, lo que abre un amplio campo de investigación para futuros estudios.

Ambas técnicas exploradas en este trabajo buscan establecer una conexión intrínseca y un vínculo profundo con la naturaleza, priorizando la pureza de los materiales como elemento clave en la arquitectura sostenible. Los arquitectos que aplican estas técnicas y materiales demuestran su capacidad para comprender el entorno, lo que el mismo proporciona, y las técnicas tradicionales así como las más contemporáneas. Este enfoque pone al hormigón como protagonista de las edificaciones, generando una arquitectura pura y sincera.

Estas técnicas pueden llegar a denominarse técnicas singulares, ya que no pueden o deben ser utilizadas de manera indiscriminada para replicar viviendas. En ellas se destaca la fusión de materiales utilizados desde la antigüedad con enfoques contemporáneos. En este contexto, la reflexión sobre el hormigón emerge con dos facetas: la versión tradicional arraigada a la sociedad por su accesibilidad y funcionalidad, y la versión que explora la capacidad del material para reinventarse hacia una arquitectura más sostenible. Es de vital importancia seguir avanzando hacia el futuro y desarrollo, pero sin perder la vista hacia el pasado y la base.

El propósito fundamental de este trabajo ha sido evidenciar la versatilidad del hormigón, desafiando las limitaciones convencionales y fomentando la experimentación. Ambas técnicas presentadas, más allá de reducir los residuos y el uso de materias primas, desafían las normas preestablecidas de la arquitectura, sugiriendo que la innovación es la clave para preservar la identidad de la arquitectura.

Actualmente, no está demasiado extendida la idea de descarbonizar la edificación, y menos aun desde un enfoque integral que abarca desde la idea de concepción del edificio. Sin embargo, a pesar de que la descarbonización total de la construcción es un objetivo a largo plazo, es esencial adoptar medidas progresivas hasta ese fin.

Como arquitectos, tenemos una gran responsabilidad en este cambio de paradigma que se está sucediendo, ya que nuestra industria es de las más contaminantes. Es importante avanzar paso a paso en este proceso, afianzando conocimientos, por eso es crucial partir desde lo que actualmente conocemos, cambiar el enfoque y evolucionar hasta alcanzar el objetivo final.

En conclusión, este trabajo subraya la necesidad de apreciar y explorar tanto las prácticas tradicionales como las innovadoras para enriquecer la arquitectura contemporánea. Mientras se avanza hacia el futuro con nuevas técnicas y materiales, no podemos subestimar la importancia de aferrarnos a las raíces tradicionales, ya que en esa diversidad reside la verdadera riqueza e identidad de la arquitectura.

BIBLIOGRAFÍA

8.
.

Bibliografía

Al Arquitectura Interior. (2020, octubre 14). Ciclo de historias mínimas Invitado Josep Ricart Ulldedmolins - H Arquitectes [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=MQpKUmVEGh8>

Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. *Environmental Impact Assessment Review*, 87, 106543.

Arrigoni, A., Beckett, C. T. S., Ciancio, D., Pelosato, R., Dotelli, G., & Grillet, A.-C. (2018). Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 11-20.

Asamblea General de las Naciones Unidas (1987). Informe 'Nuestro Futuro en Común' (A/42/427).

Asociación Española de Normalización. (2012). UNE-EN 15978:2012. Evaluación del ciclo de vida de los edificios y estructuras de construcción. Principios generales.

Asociación de Fabricantes de Cemento de Española (Oficemen). (2020). Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050.

Becosan. (2020, 18 de junio). Concreto ciclópeo. Recuperado de <https://www.becosan.com/es/concreto-ciclopeo/>

Belén Maiztegui. "¿Qué es el hormigón ciclópeo? Diversos usos y aplicaciones en obras de arquitectura" 25 oct 2021. ArchDaily en Español. Accedido el 22 Mar 2024. <https://www.archdaily.cl/cl/962231/que-es-el-hormigon-ciclopeo-diversos-usos-y-aplicaciones-en-obra-de-arquitectura> ISSN 0719-8914

Built4People (2020). People-centric sustainable built environment.

Calavera, J. (2003). Cálculos y conceptos en la historia del hormigón. En Discursos académicos de la Academia de ciencias e ingeniería de Lanzarote. Lanzarote.

Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción realizado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Recuperado de <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/valorizacion/propiedades-del-material-procesado/202/arido-reciclado-procedente-de-hormigon.html>

Ching, F. D. K., Shapiro, I. M., & Jiménez Romero, C. (2015). *Arquitectura ecológica: Un manual ilustrado*. Barcelona: Gustavo Gili.

Cloquell, V., Contreras, W., & Owen, M. (2010). La madera y los productos forestales en sistemas estructurales: Aspectos técnicos y medioambientales.

Consejo Europeo (2024). Pacto Verde Europeo. Recuperado de <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

Cordero, Á.F., Abrio, M.T., & Maqueda, M.J. (2012). El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores identificativos de su resistencia. *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*, X.

Cruz Ramos, D. (2020). Los áridos como materia prima en la normativa de hormigón en España. En V Congreso Nacional de Áridos. Recuperado de <https://www.concretonline.com/aridos/los-aridos-como-materia-prima-en-la-normativa-de-hormigon-en-espana>

Dalal, S. P., & Dalal, P. (2021). Experimental investigation on strength and durability of graphene nanoengineered concrete. *Construction and Building Materials*, 276, 122236.

Declaración de Río de Janeiro sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1992). Recuperado de <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>

Decreto 2987/1968. (1968). Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Boletín Oficial del Estado, núm. 290, páginas 17257 a 17291.

Directiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética (2018). Diario Oficial de la Unión Europea. L 156/75

Enerbuilca. (2012). Manual explicativo del Análisis de Ciclo de Vida aplicado al sector de la edificación. Barcelona.

Fayyad, T., Abdalqader, A., & Sonebi, M. (2022). An insight into graphene as an additive for the use in concrete. En Civil Engineering Research Association of Ireland Conference 2022 (CERAI 2022): Proceedings (CERAI Proceedings).

Gobierno de España (2020). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.

G. Wadel, J. Avellaneda, A. Cuchí (2010). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. *Informes de la Construcción*, vol. 62 (n517), 37-51.

Huedo, P., & López-mesa, B. (2013). Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles de edificación. *Informes de la Construcción*, vol. 65 (n529), 77– 88.

Inarquia. Hormigón autorreparable: ¿Qué es y cómo funciona? Recuperado de <https://inarquia.es/hormigon-autorreparable-que-es-como-funciona/>

Instituto Español de Baubiologie. (2022). Cimentaciones de hormigón ciclópeo. Recuperado de <https://www.baubiologie.es/cimentaciones-de-hormigon-ciclopeo/>

International Energy Agency & United Nations Environmental Program (2019). Global Status Report for Buildings and Construction

Jonkers, H. M., & Mors, R. (2012). Full scale application of bacteria-based self-healing concrete for repair purposes. En *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III: 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*

Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, 321(5887), 385-388.

Md Yunus, B., Schlangen, E., & Jonkers, H. M. (2019). Bio-Based self-healing mortar. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(9), 247-254.

Ministerio de Fomento. (2008). Anejo 13: Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad. En EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural.

Ministerio de Fomento. (2021). Anejo 15: Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. En Código Estructural.

Ministerio de Fomento. (2021). Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. En *Boletín Oficial del Estado*, núm. 190, páginas 97664 a 99452.

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). Código Estructural.

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). Anejo 2: Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad. En Código Estructural.

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). Capítulo 8: Estructuras de Hormigón. Propiedades tecnológicas de los materiales. En *Código Estructural*.

MORQ Architecture & Joe Rollo. (2020,May). Cloister House Perth, Australia. Cement Concrete & Aggregates Australia, (33), ISN 1833-0975.

MORQ. (2018). Cloister House. Recuperado de <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 100177.

OERCO2. (2017). Online Educational Resource for Innovative Study of Construction Materials Life Cycle. Estudio de los materiales utilizados en la construcción en España. Recuperado de https://oerco2.eu/wp-content/uploads/2013/02/1.2.1.-Report-Construction-materials-in-Spain_ES.pdf

Parlamento Europeo. (24 de mayo de 2023). Economía circular: definición, importancia y beneficios. Recuperado de <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201ST005603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Parlamento Europeo (2024). Position of the European Parliament adopted at first reading on 12 March 2024 with a view to the adoption of Directive (EU) 2024/... of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast).

Palmgren, M. (2022). Rammed Concrete [Tesis, KTH Royal Institute of Technology]. Architecture and Daylight Studio.

Palmgren, M. (2022). Rammed Concrete [Tesis, KTH Royal Institute of Technology]. Architecture and Daylight Studio.

Puertas, F., Alonso, M. M., & Palacios, M. (2020). Construcción sostenible. El papel de los materiales. *Revista Material-ES*, 4(4), 54-77

Proyecto GEAR. (2018). Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición

Realidad MAPEI (2023). Especial Aditivos y Descarbonización, número 31. Aditivos y Molienda Ecosostenible, páginas 18-22.

Sadagopan, M., Malaga, K., Lundin, M., & Nagy, A. (2021). Effects of Slag Addition and Mechanical Pre-Processing on the Properties of Recycled Concrete in Terms of Compressive Strength and Workability. *Nordic Concrete Research*, 64

- Sika Corporation. (2010). Manual del Hormigón.
- UNE-EN ISO 14040:2006: Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida . Principios y marco.
- Universidad Católica San Antonio de Murcia. (2016, febrero). Graphenano y la UCAM demuestran la eficiencia energética del grafeno aplicada al hormigón.<https://www.ucam.edu/noticias/graphenano-y-la-ucam-demuestran-la-eficacia-del-grafeno-aplicada-al-hormigon>
- Universidad Técnica de Delft. Self-healing concrete: Materials that can repair itself. Recuperado de <https://www.tudelft.nl/innovatie-impact/samenwerken-met-tu-delft/octrooien/selectie-van-tu-delft-patent-portfolio/self-healing-concrete-materials-that-can-repair-itself>
- Zega, C., Sosa, M., & Maio, Á. (2018). Hormigones con Agregados Reciclados

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

INTRODUCCIÓN

Figura 1. Folleto de jornada técnica. Fuente: MAPEI.

Figura 2. Evento GBCe en Zaragoza. Fuente: GBCe.

SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Figura 3. Línea temporal del desarrollo ambiental. Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Chimeneas en Pittsburg, Pensilvania, década de 1890. Fuente: Bettmann Corbis.

Figura 5. Nueva Directiva EPBD 2024. Fuente: <https://energie-m.de/info/epbd-2024.html>

Figura 6. Plan Nacional Integrado de energía y Clima. Fuente: <https://www.grupoelectrostocks.com/conoce-con-ges-que-es-el-pniec-su-importancia-para-el-instalador-profesional-n-245-es>

Figura 7. Emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de un edificio. Fuente: <https://www.armstrongceilings.com/commercial/es/performance/sustainable-building-design/embodied-carbon-in-buildings.html>

Figura 8. Emisiones de la edificación. Fuente. Elaboración propia a partir del evento GBCe Zaragoza.

Figura 9. Esquema de metodología ACV. Fuente: Elaboración propia a partir de Enerbulca. (2012). Manual explicativo del Análisis de Ciclo de Vida aplicado al sector de la edificación. Barcelona.

Figura 10. Modelo de etiqueta de Calificación Energética. Fuente: <https://certific.es/como-conseguir-la-etiqueta-energetica-de-una-vivienda.html>

Figura 11. Comercio internacional de madera aserrada. Fuente: resourcetrade.earth

Figura 12. Modelo de economía circular. Fuente: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201ST005603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Figura 13. Emisiones de CO₂ de cada material. Fuente: Redibujado a partir de M. P. Mercader, A. Ramírez de Arellano, M. Olivares (2011). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. Informes de la Construcción, vol. 64 (n527), 401-414.

HORMIGÓN CONVENCIONAL

Figura 14. Faro de Eddystone, Inglaterra, 1759. Construida por John Smeaton se considera la primera estructura donde se emplea cemento. Fuente: <https://www.secingroup.com/introduccion-al-hormigon/>

Figura 15. Viguetas Hennebique. Patente nº 13652 (1892). Fuente: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/3261/3674?inline=1>

Figura 16. Línea temporal de la normativa española del hormigón. Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Elaboración propia a partir de imagen de Cementos Bio Bio. Fuente: <https://www.archdaily.cl/cl/895291/como-construir-efectivamente-1-casa-de-hormigon-en-1-dia>

Figura 18. Proceso de fabricación del cemento. Fuente: <https://www.fundacioncema.org/proceso-de-fabricacion/>

Figura 19. Composición del clinker. Fuente: <https://www.facebook.com/cemexmexico/photos>

Figura 20. Hitos hacia la neutralidad climática a 2050. Niveles de emisión. Fuente: Elaboración propia a partir de Hoja de Ruta Oficemen.

Figura 21. Pacto Verde Europeo multidisciplinar. Fuente: <https://clusterpiedra.com/2024/05/plan-industrial-para-el-pacto-verde-europeo/#>

Figura 22. Objetivo 2030: Neutralidad Climática. Fuente: Asociación de Fabricantes de Cemento de España (Oficemen). (2020). Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050.

HORMICÓN CICLÓPEO

Figura 23. Puerta de los Leones de Micenas (Grecia). Fuente: José Álvarez Fotografía

Figura 24. Muro de contención. Fuente: <http://www.tumuro.com/muros-de-ciclopeos.html>

Figura 25. Reconstrucción con muros ciclópeos del canal La Quebrada Caroata. (Caracas),2004. <http://www.tumuro.com/muros-de-ciclopeos.html>

Figura 26. Casa del horizonte por Jesus Aparicio (Salamanca, 1996-2006). Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/casa-del-horizonte>

Figura 27. Inserción en la Universidad de Yale, Stiles and Mors Colleque por Eero Saarimen (EEUU, 1959-61). Fuente: <https://cajondearquitecto.com/2013/04/14/materia-hormigon-ciclopeo/>

Figura 28. Colocación de los bolos en la base del encofrado. Fuente: <https://www.baubioologie.es/cimentaciones-de-hormigon-ciclopeo/>

Figura 29. Vertido del hormigón. Fuente: <https://www.baubioologie.es/cimentaciones-de-hormigon-ciclopeo/>

Figura 30. Repetición de la colocación de piedras y vertido de hormigón. Fuente: <https://www.baubioologie.es/cimentaciones-de-hormigon-ciclopeo/>

Figura 31. Colocación de piedras en punta como arranque/ unión con el muro. Fuente: <https://www.baubioologie.es/cimentaciones-de-hormigon-ciclopeo/>

Figura 32. Education City Stadium. Fuente: World Walkerz

Figura 33. Pasos para ralizar un ACV comparando hormigón convencional y hormigón ciclópeo. Fuente: Elaboración propia a partir de Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.

Figura 34. Fase de excavación en la construcción del estadio. Fuente: BDP Pattern.

Figura 35. Cantidad de material usado (toneladas). Fuente: Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.

Figura 36. Uso de energía (litros de combustible). Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.

Figura 37. Huella de carbono (toneladas de CO₂-eq). Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.

Figura 38. Consumo de agua (m³). Fuente: Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.

Figura 39. Coste (\$). Fuente: Elaboración propia a partir de Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.

Figura 40. Casa 1413 desde la calle de acceso. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 40.1. Emplazamiento. Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Muro original que rodeaba la parcela. Fuente: <https://tectonica.archi/projects/casa-1413/>

Figura 42. Planta general de la vivienda. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 43. Imagen exterior de la vivienda. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 44. Imagen desde el jardín. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 45. Proceso de construcción de los muros exteriores. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 46. Aspecto del hormigón en fachada exterior hacia el jardín. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 47. Aspecto del hormigón muro interior. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 48. Aspecto del hormigón en muro hacia el vial. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 49. Tongadas y densidad de los muros a cota 0m. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 50. Tongadas y densidad de los muros a cota +1,80m. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 51. Tongadas y densidad de los muros a cota +2,40m y +2,80m. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 52. Dosificación por tongadas. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 53. Seccines de proyecto. Fuente: <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1413/>

Figura 54. Reunión de los dueños junto con los arquitectos en la vivienda. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=MQpKUmVEGh8>

HORMIGÓN RECICLADO

Figura 55. Contenedor RDC. <https://www.ismedioambiente.com/residuos-de-construccion-y-demolicion-rcds-apostando-por-su-adecuada-gestion/>

Figura 56. Demolición de edificio. <https://asetrasegovia.es/transporte-de-residuos-de-construccion-y-demolicion-obligaciones-del-transportista/>

Figura 57. Construcción de terraplén. <https://www.maccaferri.com/es/soluciones/terraplenes-reforzados/>

Figura 58. Construcción de carretera. <https://www.retema.es/actualidad/logran-pavimentar-un-camino-rural-con-aridos-reciclados-y-sostenibles>

Figura 59. Proceso de producción del árido reciclado. Fuente: <https://www.salmedinatri.com.es/venta-de-aridos/>

Figura 60. Planta de reciclaje de escombros y gestión de residuos. <https://gdp.cat/planta-de-reciclaje-de-escombros-y-gestion-de-residuos/>

Figura 61. Diagrama de flujo general del hormigón. Fuente: Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

Figura 62. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida total de RAC100-1, RAC100-2, RAC50-1 y RAC50-2 expresado en relación con RC. Fuente: Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

Figura 63. Contribución de los agregados y el transporte en el potencial de calentamiento global. Fuente: Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

Figura 64. Contribución de los agregados y el transporte en el potencial de agotamiento de los recursos abióticos. Fuente: Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

Figura 65. Contribución de los agregados a los impactos. Fuente: Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

Figura 66. Contribución del transporte. Fuente: Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, 1-12.

Figura 67. Cloister House desde el exterior. Fuente: <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

Figura 67.1. Ubicación del proyecto. Fuente: elaboración propia.

Figura 68. Acceso a la vivienda. Fuente: <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

Figura 69. Planta general de la vivienda. Fuente: <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

Figura 70. Patio de la vivienda. Fuente: <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

Figura 71. Proceso y propiedades de muro construido con áridos reciclados y técnica pisé. Fuente: Arrigoni, A., Beckett, C. T. S., Ciancio, D., Pelosato, R., Dotelli, G., & Grillet, A.-C. (2018). Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 11-20.

Figura 72. Salón de la vivienda. Fuente: <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

Figura 73. Secciones generales del proyecto. Fuente: <https://www.morq.it/projects/architecture/cloister-house/>

Figura 74. Vivienda habitada. Fuente: <https://thelocalproject.com.au/videos/cloister-house-by-morq-project-feature-the-local-project/>

NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Figura 75. Aspecto interior del hormigón. Fuente: Universidad Técnica de Delft.

Figura 76. Proceso de regeneración. Fuente: Artículo Self Healing Concrete por Yas Associates en LinkedIn.

Figura 77. Aspecto de una grieta reparada. Fuente: Universidad Técnica de Delft.

Figura 78. Representación del grafeno. Fuente: <https://www.products.pcc.eu/es/blog/grafeno-que-es-y-para-que-sirve/>

Figura 79. Prueba de impermeabilidad. Fuente: <https://www.ucam.edu/noticias/graphenano-y-la-ucam-demuestran-la-eficacia-del-grafeno-aplicada-al-hormigon>

ANEXOS

6. HORMIGÓN CICLÓPEO; Evaluación del Ciclo de Vida Comparando hormigón ciclópeo y hormigón convencional.

Fuente de figuras y tablas: Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87, 106543.

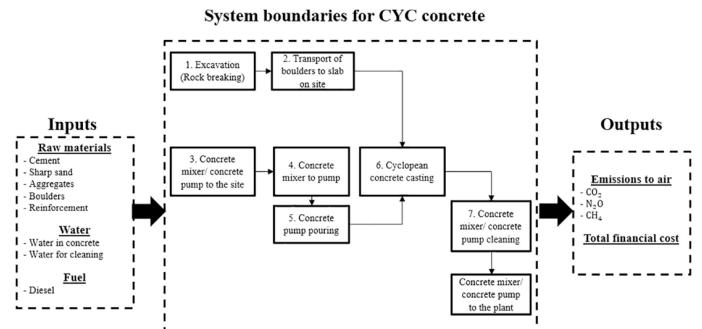


Figura A: Límites del sistema del hormigón ciclópeo.

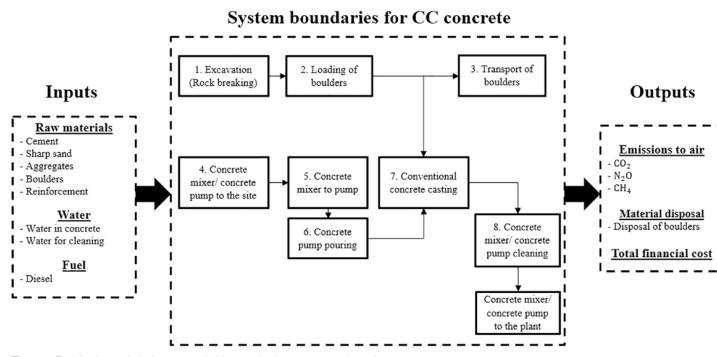


Figura B: Límites del sistema del hormigón convencional.

Activity	Truck type/concrete ingredients	Amount of diesel/concrete ingredients consumed	CO2-eq emissions (kg CO2-eq)
Excavation/rock breaking	Hammer excavators	Hammer Excavator fuel consumption: 32.52 l/h Equipment = 36 m³/h Excavation fuel consumption: (6500 m³ / 36 m³/h) x 32.52 l/h = 5871.7 l	5871.7 l x 2.7 kg CO2-eq/l = 15,853.59 kg CO2-eq
Transport excavated boulders to the slab	Front-wheel loader	Front-wheel loader fuel consumption: 16.43 l/h. Trips: 6500 m³ / (4.7 m³ bucket capacity x 0.60 yield loss) = 2305 Duration: ≥ 12 min / trip = (2305 / 60 mins.) x ≥ 12 min = 461 h Transport fuel consumption: 461 h x 16.43 l/h = 7574.23 l	7574.23 l x 2.7 kg CO2-eq/l = 20,450 kg CO2-eq
Producing RC ingredients	Portland Cement (PC) Coarse aggregates Sharp sand Water Reinforcing steel	PC = 4365 tons Coarse Aggregates = 16,366 tons Sharp sand = 8183 tons Water = 2400.21 m³ Reinforcing steel = (13,637 m³/1000) x 115 kg/m³ (Rafts) = 1568.26 tons	PC = 4,365,000 kg x 0.8 kg CO2-eq/kg = 3,492,000 kg CO2-eq Coarse aggregates = 16,366,000 x 0.04 kg CO2-eq/kg = 654,640 kg CO2-eq Sharp sand = 8,183,000 kg x 0.004 kg CO2-eq/kg = 32,732 kg CO2-eq Reinforcing steel = 1,568,260 kg x 1.31 kg CO2-eq/kg = 2,054,420.6 kg CO2-eq
Concrete mixer/pump transportation	Concrete mixer	Distance from the concrete plant: 40 km Number of Trips (loads): 13,637 m³/ 8 m³ (capacity) = 1705 Mixer Truck Fuel efficiency for empty truck: 0.714 l/km Mixer Truck Fuel efficiency for loaded truck: 0.84 l/km Travel & Return Trip Average fuel efficiency per trip: 0.77 l/km Mixer Truck Fuel Consumption per trip: (40 x 2 km) x (0.77 l/km) = 61.77 l Mixer Truck Transportation: 1705 trips x 61.77 = 105,318 l Pump Truck Fuel Efficiency: ≥ 30 l/100 km = 0.3 l/km Pump Truck Transportation: [(0.3 l/km x 40 km) x 45	105,318 l x 2.7 kg CO2-eq/l = 284,358.6 kg CO2-eq

Tabla A: Emisiones de CO2-eq y coste total derivado de la producción de hormigón ciclópeo.

Activity	Truck type/ concrete ingredients	Amount of diesel/ concrete ingredients consumed	CO ₂ -eq emissions (kg CO ₂ -eq)
		times \times 2 way = 1080 l	
Concrete mixer to pump	Concrete mixer	Number of Trips (loads): 13,637 m ³ / 8 m ³ (capacity) = 1705 Discharging Rate (concrete): \geq 2 m ³ / min Queuing Time: 8m ³ / 2m ³ = 4 \times 1705 = 6820 min Mixer truck fuel consumption: 11.13 l/ h Queuing Total Fuel Consumption: = ([6820 mins / 60 mins.] \times 11.13 = 1265 l	1265 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 3415.5 kg CO ₂ -eq
Concrete pouring	Concrete pump	Concrete pump truck discharge rate: 38 m ³ / h CO ₂ -eq/l = 25,855.2 kg CO ₂ -eq Concrete pump truck fuel consumption: 0.7 l/m ³ (26.6 l per hour) Concrete pouring duration: 13,637 / 38 = 359 h Number of Casting (Pouring): 359 h. / 8 h. operation = 45 Pouring of Concrete Fuel Consumption: (45 \times 26.6) \times 8 h = 9576 l	9576 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 25,855.2 kg CO ₂ -eq
Cleaning	Concrete mixer	Mixer Truck Cleaning time: \geq 5 min = 1705 \times 5 = 8525 min Mixer truck fuel consumption: 11.13 l/ h Cleaning Fuel Consumption = 8525 min/60 min \times 11.13 l/h = 1581.3 l Water consumption (liters): Concrete Mixer: \geq 200 l \times 1705 = 341,000 l	1581.3 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 4269.51 kg CO ₂ -eq
	Concrete pump	Concrete pump truck cleaning time: \geq 10 min kg CO ₂ -eq Cleaning Fuel Consumption = [(45 \times 10 min) / 60 mins] \times 26.6 l/h = 199.5 l Water consumption (liters): Concrete Pump Truck: \geq 250 l \times 45 = 11,250 l Costs: Diesel cost = 0.55 \$/liter x 132,465.73 l = 72,856.15 \$ PC cost = 4365 tons \times 60.42 \$/ton = 263,733.3 \$ Coarse aggregate cost = 16,366 tons \times 20.6 \$/ton = 337,139.6 \$ Sharp sand cost =	199.5 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 538.65 kg CO ₂ -eq Total emissions: 6,591,449.65 kg CO ₂ -eq

Tabla A (continuación)

Activity	Truck type	Amount of fuel consumed (Liters)	kg CO ₂ -eq
Excavation/ rock breaking	Hammer excavators	Hammer Excavator fuel consumption: 32.52 l/h Breaking of Rocks: \geq 6 m ³ /h. \times 6 equipment = 36 m ³ /h Excavation fuel Consumption: (6500 m ³ / 36 m ³ /h) \times 32.52 l/h = 5871.7 l	5871.7 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 15,853.59 kg CO ₂ - eq
Loading of excavated boulders to trucks	Excavator	Excavator Truck Fuel Consumption: 32.52 l per hour Bucket capacity: 1.68 m ³ (40% for yield loss consideration) Number of buckets: 6500 m ³ / (1.68 m ³ / bucket \times 0.40) = 9673 buckets Loading duration: (\geq 1-min (per bucket) \times 9673) / 60 min = 161.22 h Loading Fuel Consumption: 161.22 \times 32.52 = 5242.90 l	5242.90 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 14,155.83 kg CO ₂ - eq
Truck trip for boulders disposal	Tipper truck	Tipper Truck Capacity: 22 m ³ Number of Trips: 6500 m ³ / 22 m ³ = 296 trips Distance from dumping site: 50 km Tipper Truck Fuel efficiency (Km per liter): 2.7201 Disposal Fuel Consumption: [(50 km \times 2) / (2.7201 km/ l)] \times 296 = 10,881.95 l	10,881.95 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 29,381.27 kg CO ₂ - eq
Producing RC ingredients	Portland Cement (PC) Coarse aggregates Sharp sand Reinforcing steel	PC = 5762 tons Cement (PC) Coarse Aggregates = 21,606 tons Sharp sand = 10,803 tons Reinforcing steel = Water = 3168.75 m ³ Reinforcing steel = (18,000 m ³ /1000) \times 115 kg/m ³ (Rafts) = 2070.6 tons Sharp sand = 10,803,000 kg \times 0.004 kg CO ₂ -eq/kg = 43,212 kg CO ₂ -eq Reinforcing steel = 2,070,600 kg \times 1.31 kg CO ₂ -eq/kg = 2,712,486 kg CO ₂ -eq	PC = 5,762,000 kg \times 0.8 kg CO ₂ -eq/kg = 4,609,600 kg Coarse aggregates Sharp sand = 10,803 kg CO ₂ -eq Coarse aggregates Water = 3168.75 m ³ \times 0.04 kg CO ₂ -eq/kg = 21,606,000 kg \times 0.04 kg CO ₂ -eq/kg = 864,240 kg CO ₂ - eq 2070.6 tons Sharp sand = 10,803,000 kg \times 0.004 kg CO ₂ -eq/kg = 43,212 kg CO ₂ -eq Reinforcing steel = 2,070,600 kg \times 1.31 kg CO ₂ -eq/kg = 2,712,486 kg CO ₂ -eq
Concrete mixer/ pump transportation	Concrete mixer	Distance from the concrete plant: 40 km Mixer Truck Fuel efficiency for empty truck (Km per liter): 1.40 Mixer Truck Fuel efficiency for loaded truck (Km per liter): 1.19 Travel & Return Trip Average fuel efficiency per trip (Km per liter): 1.295	139,044 l \times 2.7 kg CO ₂ -eq/l = 375,418.8 kg CO ₂ - eq

Tabla B: Emisiones de CO₂-eq y coste total derivado de la producción de hormigón convencional.

Activity	Truck type	Amount of fuel consumed (Liters)	kg CO ₂ -eq
		Mixer Truck Fuel Consumption per trip: $(40 \times 2) / 1.295 =$	
		61.77 l	
		Number of Trips (loads): $18,000 \text{ m}^3 / 8 \text{ m}^3$ (capacity) = 2251	
		Mixer Truck Transportation: 2251 trips $\times 61.77 =$	
		139,044 l	
	Concrete pump	Pump Truck Fuel Efficiency: $\geq 30 \text{ l/100 km} = 0.3 \text{ l/km}$	$1416 \text{ l} \times 2.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq/l} = 3823.2 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
		Pump Truck Transportation: $[(0.3 \text{ l/km} \times 40 \text{ km}) \times (59 \text{ trips} \times 2 \text{ way})] = 1416 \text{ l}$	
Concrete mixer to pump	Concrete mixer	Discharging Rate (concrete): $\geq 2 \text{ m}^3/\text{min}$	$1670.24 \text{ l} \times 2.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq/l} = 4509.65 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
		Queuing Time: $8 \text{ m}^3 / 2 \text{ m}^3 = 4 \times 2251 = 9004 \text{ min}$	
		Mixer truck fuel consumption: 11.13 l/h	
		Queuing Total Fuel Consumption: $=[(9004 \text{ mins} / 60 \text{ mins})] \times 11.13 = 1670.24 \text{ l}$	
Concrete pouring	Concrete pump truck	Concrete pump truck discharge rate: $38 \text{ m}^3/\text{h}$	$12,555.21 \text{ l} \times 2.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq/l} = 33,899.04 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
		Concrete pump truck fuel consumption: 0.7 l/m^3 (26.6 l per hour)	
		Concrete pouring duration: $18,005 / 38 = 473.82 \text{ h}$	
		Number of Casting (Pouring): $473.52 \text{ h.} / 8 \text{ h. operation} = 59$	
		Pouring of Concrete Fuel Consumption: $(59 \times 26.6) \times 8 \text{ h} = 12,555.21 \text{ l}$	
Cleaning	Concrete mixer	Mixer Truck Cleaning time: $\geq 5 \text{ min} \times 2251 = 11,255 \text{ min}$	$2087.64 \text{ l} \times 2.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq/l} = 5636.63 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
		Cleaning Fuel Consumption = $(11,255 \text{ min} / 60 \text{ min}) \times 11.12911 \text{ l/h} = 2087.636 \text{ l}$	
		Water consumption (liters): Concrete Mixer: $\geq 200 \text{ l} \times 2251 = 450,200 \text{ l}$	
	Concrete pump	Concrete pump truck cleaning time: $\geq 10 \text{ min}$	$261.6 \text{ l} \times 2.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq/l} = 706.32 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
		Cleaning Fuel Consumption = $[(59 \times 10) / 60 \text{ mins}] \times 26.6 = 261.6 \text{ l}$	
		Water consumption (liters): Concrete Pump Truck: $\geq 250 \text{ l} \times 59 = 14,750 \text{ l}$	
		Costs: Diesel cost = 0.55	

Tabla B (continuación)

6. HORMIGÓN RECICLADO; Combinación de ACV e Índice de Circularidad para la Evaluación del Impacto ambiental del hormigón reciclado.

Fuente de figuras y tablas: Kadawo, A., Sadagopan, M., During, O., Bolton, K., & Nagy, A. (2022). Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 12, 1-12.

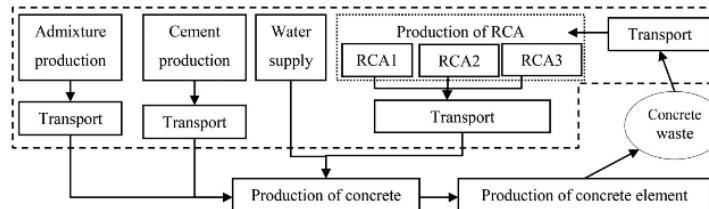


Figura C: Diagrama de flujo de RAC100 en el escenario 1 (RAC100-1).

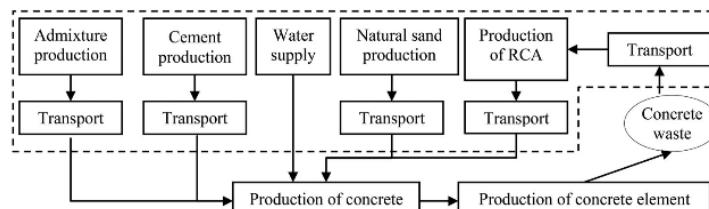


Figura D: Diagrama de flujo de RAC50 en el escenario 1 (RAC50-1).

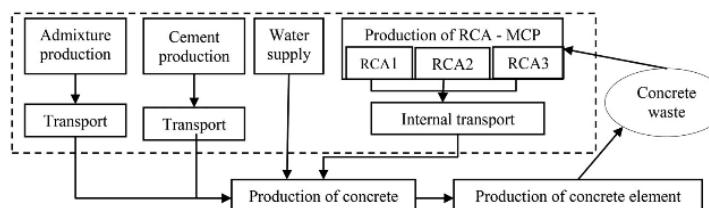


Figura E: Diagrama de flujo de RAC100 en el escenario 2 (RAC100-2).

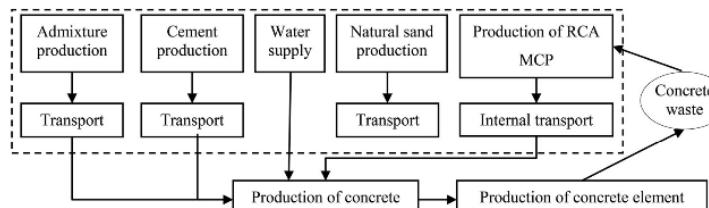


Figura F: Diagrama de flujo de RAC50 en el escenario 2 (RAC50-2).

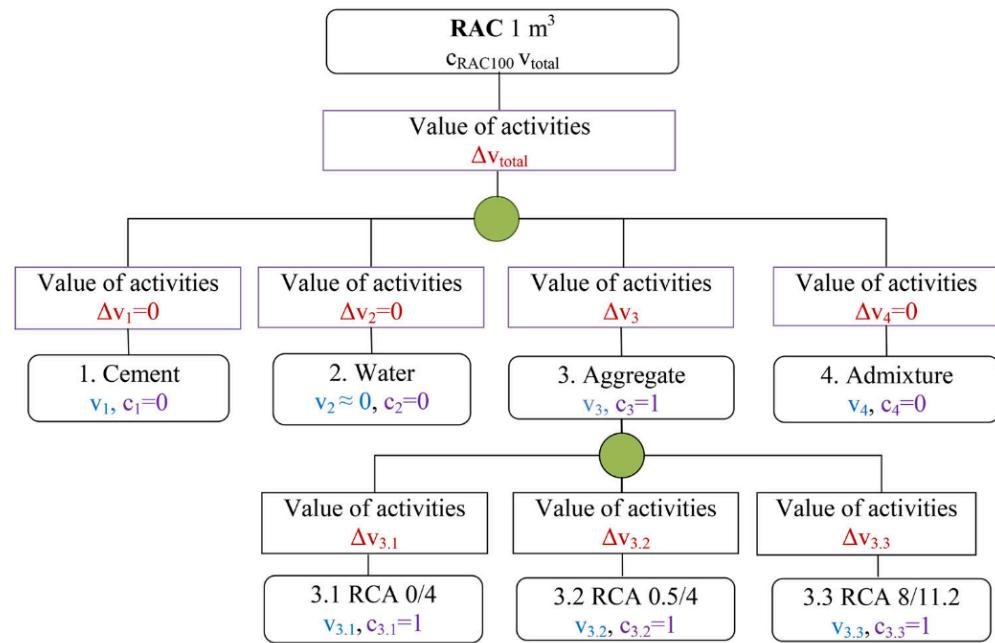


Figura G: Árbol de productos para RAC100, v: valor del material, Δv : valor de las actividades y c: índice de circularidad.