

Claudia Martínez Tábara

HACIA LA SOSTENIBILIDAD DEL HORMIGÓN PREFABRICADO

Avances para reducir los impactos ambientales



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Claudia Martínez Tábara

Hacia la sostenibilidad del hormigón prefabricado

Avances para reducir el impacto ambiental

HACIA LA SOSTENIBILIDAD DEL HORMIGÓN PREFABRICADO

Avances para reducir los impactos ambientales

Estudiante

Claudia Martínez Tábara

Tutor

Javier Pinilla Melo

Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas.

Aula TFG 8

Luis Sánchez Aparicio, *coordinador*

Enrique Moreno Pérez, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

ÍNDICE

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

INTRODUCCIÓN

Motivación

1. ESTADO DE LA CUESTIÓN
 - 1.1 El hormigón prefabricado
 - 1.2 El ciclo de vida del hormigón
 - 1.3 Impactos del hormigón
2. METODOLOGÍA
 - 2.1 Alcance de la evaluación
 - 2.2 Desglose de estructura y mediciones
 - 2.3 Obtención de indicadores ambientales y uso de recursos
 - 2.4 Análisis y comparación de resultados
3. RESULTADOS
 - 3.1 Presentación casos de estudio
 - 3.2 Comparativa de modelos
 - 3.3 Gráficos de impactos
4. DISCUSIÓN
 - 4.1 Caso 1
 - 4.2 Caso 2
5. CONCLUSIONES
 - 5.1 Caso 1
 - 5.2 Caso 2
6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

FUENTES

Bibliografía y recursos digitales

Procedencia de las ilustraciones

Resumen

En este trabajo de investigación de fin de grado, se realiza un estudio acerca del grado de sostenibilidad de la construcción prefabricada a través de la investigación y comparación de las técnicas constructivas para poder aportar una visión crítica acerca de su impacto ambiental.

Hoy en día en España, ha nacido una corriente que apuesta por la construcción de bajo impacto ambiental, pues el sector de la construcción es una de las industrias que mayor huella de CO2 provoca con su consumo.

En concreto dentro de esta industria, el hormigón es el principal material de construcción en el mundo, el hormigón prefabricado, en concreto, es un elemento central en la construcción debido a su eficiencia productiva, durabilidad y resistencia. Sin embargo, su producción puede seguir creando impacto en el medioambiente, motivo de estudio en esta investigación. El trabajo se desarrolla precedido de una introducción y explicación de los términos que se van a desarrollar.

A continuación, se desarrolla un barrido tanto histórico como analítico de los temas de mayor interés y relevancia de esta investigación donde se hará más hincapié para llegar a entender la relevancia de la sostenibilidad en la construcción con elementos prefabricados.

Una vez habiendo hecho un recorrido por estos temas y explicado la metodología, se escogen dos casos de estudio de proyectos reales cedidos por un estudio de arquitectura para desarrollar un análisis comparativo de la construcción con hormigón prefabricado y la construcción con hormigón armado in-situ. Este desarrollo irá acompañado de datos estimativos de dimensiones de estructuras necesarias para cada caso obtenidos a partir de los planos de los proyectos y los datos de impactos ambientales generados con la herramienta de estudio Cype, Generador de precios.

El objetivo final del trabajo es comparar y evaluar los sistemas constructivos para dos casos de estudio con elementos de hormigón prefabricado y con métodos de construcción tradicional in-situ. A través de una comparación de cantidad de material empleado, así como impacto medioambiental en cuanto a emisiones de C2 producidas en cada proceso. Con el fin del obtener un análisis crítico sobre la sostenibilidad de la construcción en hormigón prefabricado.

Abstract

In this final degree research project, we study the degree of sustainability of prefabricated construction through research and comparison of construction techniques in order to provide a critical perspective on its environmental impact.

Today, in Spain, a movement has emerged that advocates for low-environmental-impact construction, as the construction sector is one of the industries with the largest CO2 footprint due to its consumption.

Within this industry, concrete is the main construction material worldwide. Precast concrete, in particular, is a central element in construction due to its productive efficiency, durability, and strength. However, its production can continue to have an impact on the environment, which is the subject of study in this research. The project is preceded by an introduction and explanation of the terms that will be discussed.

This is followed by a historical and analytical overview of the most interesting and relevant topics in this research, with a greater emphasis on understanding the importance of sustainability in construction with prefabricated elements. Once these topics have been covered and the methodology explained, two case studies from real projects provided by an architectural firm are selected to develop a comparative analysis of precast concrete construction and in-situ reinforced concrete construction. This analysis will be accompanied by estimated structural dimensions required for each case, obtained from the project plans, and environmental impact data generated using the CYPE Price Generator study tool.

The ultimate objective of the work is to compare and evaluate construction systems for two case studies using precast concrete elements and traditional in-situ construction methods. This analysis will be done through a comparison of the quantity of materials used, as well as the environmental impact in terms of CO2 emissions produced in each process. This analysis will provide a critical analysis of the sustainability of precast concrete construction.

Palabras clave

Hormigón prefabricado · Sostenibilidad · Eficiencia energética · Emisiones de CO2 · Ciclo de vida

Hormigón prefabricado: Material de construcción que se moldea y cura en fábricas antes de ser transportado y ensamblado en el sitio de construcción. Su producción controlada reduce impactos y permite el uso eficiente de recursos.

Sostenibilidad:

Gestionar los recursos para satisfacer las necesidades actuales, sin poner en riesgo las necesidades del futuro. Esto considerando el desarrollo social, económico y el cuidado del medio ambiente en un marco de gobernabilidad”

Eficiencia energética:

La eficiencia energética en el hormigón prefabricado se refiere a su capacidad para mantener temperaturas internas estables en edificios. Esto se logra gracias a su alta masa térmica, que absorbe y libera calor lentamente, reduciendo la necesidad de sistemas de calefacción y refrigeración. Este comportamiento térmico optimiza el consumo de energía y contribuye a la sostenibilidad de las construcciones.

Emisión de CO2:

Las emisiones de CO2 en el hormigón prefabricado provienen de su producción y transporte. Mejorar la eficiencia, usar tecnologías de bajo carbono y una logística eficiente ayudan a reducir estos impactos ambientales.

Ciclo de vida:

El ciclo de vida de un edificio es un proceso que permite evaluar todos los aspectos ambientales, estructurales, productivos, de transporte, etc. Estas variables tienen que ver con el tiempo de duración de dicha edificación y su impacto en el medio ambiente.

Introducción

El hormigón, es uno de los materiales más versátiles y ampliamente utilizado en la arquitectura y la construcción moderna. Compuesto por cemento, agua, áridos como arena o grava, y adiciones y aditivos opcionales, se caracteriza por su maleabilidad en estado fresco y su gran resistencia a compresión. Estas propiedades lo han convertido en el material más empleado de la historia en obras arquitectónicas e infraestructuras.

Históricamente, el hormigón ha sido fundamental en la ingeniería, con ejemplos notables como los acueductos y el Panteón de Roma, construidos con mezclas primitivas de cal y puzolana. Sin embargo, tras la caída del Imperio Romano, su uso decayó. El siglo XIX marcó un hito con la invención del cemento Portland por Joseph Aspdin y el desarrollo del hormigón armado, que combina hormigón con acero de armar.

En términos de comportamiento mecánico, el hormigón destaca por su alta resistencia a compresión, lo que lo hace ideal para elementos estructurales como vigas, columnas y losas. Para abordar su limitación frente a la tracción, se han desarrollado técnicas como el hormigón armado, pretensado y postensado, que mejoran su capacidad estructural. Además, es un material duradero, resistente al fuego y a condiciones climáticas adversas, aunque puede deteriorarse por agentes químicos o ambientales si no se protege adecuadamente.

Sin embargo, la sostenibilidad en el ámbito de la arquitectura, es un tema de especial interés en la actualidad, se ha convertido en un objetivo clave para la industria de la construcción, pues el impacto ambiental que conlleva la producción de estos materiales de construcción es muy significativo.

En la construcción, se ha tratado de optimizar en cuestiones de tiempo y economía, por lo que no es de extrañarse que la industria de prefabricados se haya convertido en una opción muy atractiva en las fechas actuales.

En países en desarrollo, se requiere con urgencia identificar tecnologías para la construcción de vivienda social que sean compatibles con las necesidades habitacionales de la población, así como sus condiciones socioeconómicas y medioambientales.

Iniciativas como el «Objetivo 55» de la Unión Europea buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para 2030 y alcanzar la neutralidad climática en 2050. En el ámbito de la edificación, la UE ha subrayado la importancia de actualizar los estándares de eficiencia energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en este sector.

Actualmente, el 60% de las emisiones totales de la UE provienen de los sectores de transporte, agricultura, edificación, industria y residuos. El Objetivo 55 pretende reducir hasta en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por estos sectores para 2030. En cuanto al sector de la edificación, existen amplias oportunidades de reducción, dado que el 75% de los edificios actuales en la Unión Europea son ineficientes desde el punto de vista energético y requieren una renovación a gran escala. ¹

¹ (S/f). Europa.eu.

Por otro lado, además de sus cualidades estructurales, el hormigón ha evolucionado como un recurso estético en la arquitectura. Su capacidad para adoptar formas complejas y acabados personalizados lo ha transformado en un elemento creativo clave. Técnicas como el hormigón visto destacan su textura natural, mientras que su combinación con otros materiales amplía las posibilidades de diseño. El hormigón es mucho más que un material de construcción, es un reflejo de la innovación tecnológica y la adaptación a las necesidades cambiantes de la humanidad.



Figura 01. Objetivo 55 Plan de la Unión Europea. Fuente: Consejo de la Unión Europea

Motivación

El motivo de realización de este trabajo, como se mencionaba anteriormente, surge de la necesidad de abordar la sostenibilidad en el ámbito de la construcción, pues es uno de los principales contribuyentes a la situación de crisis climática que nos aborda hoy en día.

Un gusto personal por investigar acerca de un tema de interés global en este campo, el cual va a determinar el futuro de la construcción en los próximos años.

En concreto, se centra el objeto de la investigación en este tipo de hormigón, el hormigón prefabricado, pues es el de mayor impacto en el ámbito de innovación en la construcción.

El desarrollo del trabajo, comenzará con un análisis del material base, el hormigón, según sus características y comportamiento mecánico en estructuras, se habla acerca de su ciclo de vida e impacto ambiental.

1. Estado de la cuestión

1.1 El hormigón prefabricado

El hormigón prefabricado es un material con una naturaleza bien diferenciada del hormigón armado. Su primer rasgo característico es ser un material producido en la industria en forma de elementos acabados. La consecuencia de su forma de producción es elevar considerablemente las magnitudes de todas sus características físicas como la resistencia mecánica, el acabado de la superficie, la adherencia o la resistencia a la corrosión e introducir el control de calidad y la precisión propios de la fabricación industrial. Es un material fabricado por moldeo y capaz, en principio, de adoptar cualquier forma. La principal limitación, como en cualquier material, la establecemos nosotros al trazar un límite a la amortización del molde. Todo es posible pero no todo es razonable. Inevitablemente consideraremos toda forma en montaje como un sistema de piezas repetidas y/o variables a partir de un patrón. La construcción prefabricada es inseparable de la invención del pretensado. Con este avance, se supera la principal limitación del hormigón armado que es la fisuración, se daba entrada a los nuevos materiales como hormigones y aceros de alta resistencia y, en definitiva, se amplía netamente sus posibilidades.

Las estructuras prefabricadas de hormigón son cada vez más empleadas en ingeniería civil y edificación. Sus aplicaciones en construcción de edificios prefabricados van desde el uso en construcciones residenciales de viviendas unifamiliares con paneles portantes y forjado alveolares, edificios de aparcamientos, construcción de edificios de uso público, edificios industriales de grandes luces y planta única para centros logísticos, comerciales, naves de usos varios, y en los últimos tiempos, construcción de viviendas económicas en países en desarrollo.

En la composición del hormigón prefabricado entran en juego, básicamente, 3 materiales; cemento, áridos y agua. Además de los aditivos y adiciones que puedan añadirse para aportar propiedades específicas según el uso que vayan a tener. La mezcla resultante se coloca en unos moldes antes de llegar a la fase de fraguado donde se completará la forma necesaria para el tipo de proyecto para el que se vaya a emplear.

Un rasgo fundamental del hormigón prefabricado es su discontinuidad. Frente al hormigón armado, una construcción prefabricada nunca será una pieza única y la resolución de sus uniones será determinante para el comportamiento del sistema. Básicamente el problema de la unión se ha abordado tradicionalmente con dos técnicas diferentes. La primera solución sería resolver cualquier montaje por simple apoyo.

La técnica del hormigón prefabricado quedaría así limitada a construcciones muy elementales, incorporando un sistema de estabilización del tipo que sea, puesto que en general el nudo apoyado resulta en sistemas inestables.

Por otro lado, el montaje se ha tratado de resolver a través de uniones rígidas, procurando solidarizar durante el proceso de montaje piezas independientes.

Los sistemas básicos que han resuelto este tipo de uniones han sido a base de placas metálicas soldadas o de reserva de zonas sin hormigonar, en donde se resuelven los solapes entre armaduras y se termina la junta con un hormigonado en obra. En general, resultan soluciones heterogéneas y de complicada ejecución, sobre todo cuando las juntas trabajen en flexión.

A su vez, podemos distinguir entre hormigón prefabricado pretensado, sometido a la combinación de hormigones de alta resistencia con acero y hormigón postensado, sometido a esfuerzos de compresión por cables de acero, tras su vertido y fraguado.

La característica fundamental del hormigón pretensado es que equipa una armadura de acero en el interior. Como bien indica el nombre, la armadura tensada antes del hormigonado. Ya que su montaje es industrializado, esta tipología se asocia siempre de manera directa con los prefabricados de hormigón.

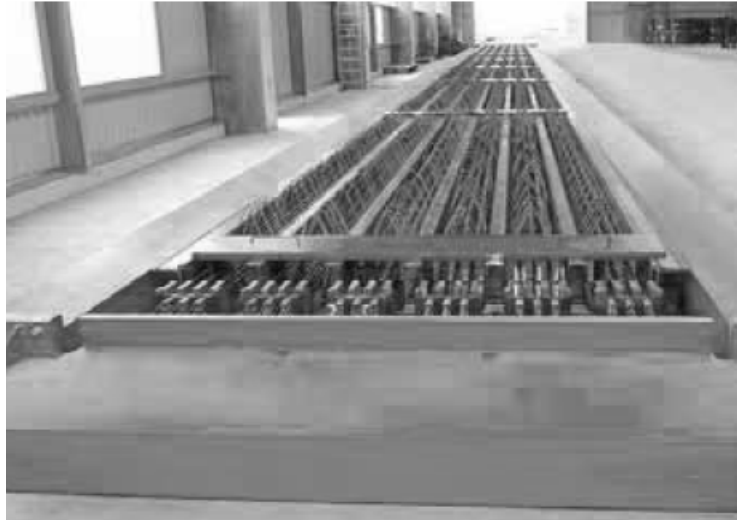


Figura 02. Máquina usada para pretensar el hormigón. Fuente: weckenmann.com

Por otro lado, en España, Eduardo Torroja utiliza de forma intuitiva la idea de pretensado en la estructura del acueducto del Tempul en 1925, para controlar la fisuración y acotar el alargamiento de los tirantes.

A esta genialidad demostrada por Torroja se deben las primeras estructuras pretensadas construidas en España, adelantadas y pioneras de la historia del pretensado, con una funcionalidad y estética característica.²

Algunos ejemplos son la cubierta del mercado de Algeciras en 1935 con una cúpula esférica de diámetro 47.8 m y el acueducto de Alloz en 1939, una estructura donde con gran lucidez se aplican los principios de la técnica del pretensado con formulados por Eugène Freyssinet.

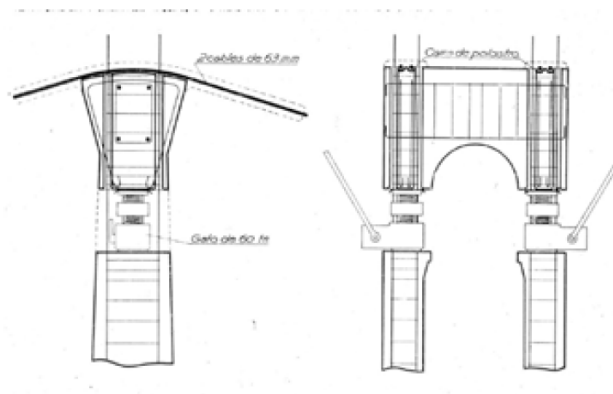


Figura 03. Estructura de Eduardo Torroja. Acueducto en Tempul 1925. Fuente: www.cehopu.cedex.es

Y, por otro lado, el hormigón postensado que resulta protagonista de actuaciones in situ. La principal diferencia entre ambos como su propio nombre indica, es el orden de hormigonado y compresión de la armadura interior. En este caso, primero tiene lugar el proceso de hormigonado y después llega el momento de tensar la armadura interior. En construcción, por regla general, el hormigón postensado es usado en estructuras que reciben elevadas cargas y que presentan grandes separaciones entre los apoyos (luces). En tal situación constructiva, su uso resulta necesario debido al costo de los materiales y por el alto peso de la estructura, lo cual conduce principalmente al agrietamiento, deformaciones y reducción de la vida útil.

² Pérez, A. B. (2019).

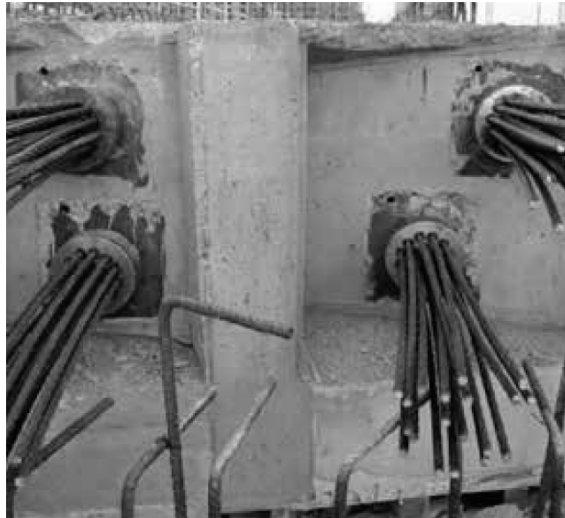


Figura 04. Hormigón postensado. Fuente: es.wikipedia.org/wiki/

Archivo: Acero_postesado

El hormigón prefabricado tiene la particularidad de que se usa en una diversidad de elementos aislados como son: vigas, pilares, forjados, dinteles, paneles, bloques, cimentaciones, bovedillas o placas alveolares.

Este gran avance en cuanto a rapidez de fabricación y montaje de las estructuras ha permitido que se vaya desarrollando la corriente de arquitectura industrializada que cada vez toma mayor protagonismo en el sector.

En primer lugar, las vigas prefabricadas son elementos estructurales de hormigón reforzado que se fabrican en un entorno controlado y se transportan al lugar de construcción para su ensamblaje. Según la empresa de prefabricación que se requiera, se van a fabricar un tipo específico de vigas u otra, adaptándose siempre a la necesidad del proyecto.

Algunas de las secciones más habituales con las cuales el fabricante suele contar de una gama determinada, aunque se puede adaptar los elementos en cantos y longitudes dependiendo de los requisitos específicos de cada proyecto son:

Vigas en doble I (o doble T)

Se trata de elementos generalmente de hormigón pretensado, aunque también pueden estar sin pretensar. Tienen sección constante, pudiendo incorporar macizados en sus apoyos en función de las solicitudes de proyecto.

En edificación a grandes escalas se emplean las llamadas vigas puente, en obras con dimensiones menores los elementos pretensados más característicos suelen ser viguetas pretensadas



Figura 05. Vigas pretensadas de hormigón. Fuente: Hormisur prefabricado de hormigón

Vigas peraltadas

Una variante de la sección I son las llamadas vigas delta, pero de canto creciente hacia la cumbrera y pendiente aprox. del 10%. Pueden ser armadas o pretensadas en función de las luces a salvar y las cargas consideradas en proyecto, y pueden cubrir toda la luz o estar divididas en varios tramos.

De uso óptimo para la ejecución de naves industriales con cubierta a dos aguas, ya que permite vanos diáfanos de hasta 50 m. Pueden incluso contar en sus almas con los orificios para el paso posterior de instalaciones.



Figura 06. Vigas delta de hormigón prefabricado. Fuente: Tecnyconta

Vigas de doble nervio

Son elementos de sección constante con doble nervio en T invertido de hormigón pretensado. El doble nervio proporciona al forjado una elevada rigidez de torsión y una óptima distribución transversal de cargas. Dimensiones típicas comprenden altura de nervio entre 50 y 100 cm, y anchura de ala de 80 o 120 cm. Se colocan en obra adosadas o separadas con capa de compresión completamente maciza o aligerada mediante planchas de chapa metálica grecada.



Figura 07. Vigas TWIN de hormigón prefabricado. Fuente: Hormipresa Archi/expo

Viga rectangular

Son vigas de hormigón tanto armado como pretensado, de sección rectangular y canto constante, usualmente con anchos de 50 cm y canto variable hasta 110 cm. Su aplicación principal es la de servir de apoyo a forjados de placas alveolares.

Por otro lado, las vigas en "L", también sirven de apoyo de placas alveolares en uno de sus lados, así como vigas de pórticos.

Las vigas que sirven de apoyo de placas en forjado por ambas caras se denominan vigas en "T" invertida. Estas pueden ser prefabricadas de hormigón pretensado, con anchos usuales de 30 a 120cm y cantos hasta 180cm.



Figura 08. Estructura de elementos prefabricados. Fuente: Hormipresa Archi/expo

1.1.1 Estudio histórico estructuras prefabricadas

Se muestran a continuación, algunos ejemplos que han marcado diferencia a lo largo de la historia en el desarrollo de esta técnica constructiva y que hoy en día siguen resultando de una audacia y genialidad dignas de resaltar son las denominadas vigas "hueso" de Fisac (nombre dado por su semejanza morfológica y tensional) construidas por piezas o dovelas y postesadas en obra, cuyo nacimiento y concepto se explica en Hormigón y Acero. (Fisac, M.; 1970).

Los denominados huesos de Fisac, piezas huecas de hormigón pretensado con formas similares a estructuras óseas, forman parte de una búsqueda obsesiva por encontrar la pieza ideal, aquella que resuelva todas las funciones constructivas, estructurales y arquitectónicas en una solución única. Su historia abarca un amplio periodo temporal y su génesis y posteriores conclusiones se extienden a lo largo de la dilatada carrera profesional del arquitecto. Sin embargo, la producción e investigación sobre estas piezas se acota temporalmente en una década, los años sesenta del siglo XX, época de pioneros, de técnicas en desarrollo y de impulso económico.³

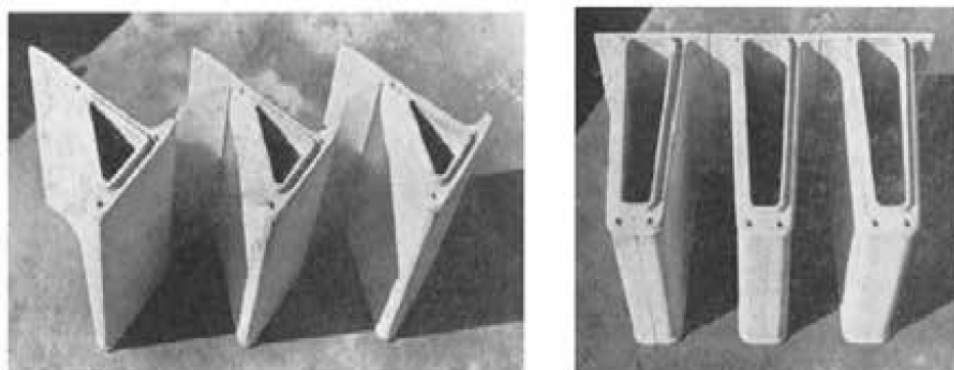


Figura 09. Piezas huecas pretensadas. Fuente: Fisac, M (1970)

1.1.2 Estudio actual de estructuras prefabricadas

En este estudio de las estructuras prefabricadas de hormigón, se quiere englobar el conjunto de elemento portantes que conforman el esqueleto de un edificio, contraído en una central o fábrica y transportadas a obra para ser instaladas. Los elementos estructurales están fabricados de hormigón armado o pretensado y las fases de construcción consisten en fabricación e instalación fija, transporte y montaje en obra de los elementos prefabricados.

Las estructuras más habituales en la construcción de grandes edificaciones como naves industriales, la cual va a ser caso de estudio de la investigación, son las de sistema o conjunto estructural formado por tres elementos: pilar, viga y correa, con estructuras con las vigas simplemente apoyadas sobre pilares (nudo pilar-viga articulado).

³ Pérez, A. B. (2019).

Los pilares prefabricados de hormigón son los elementos que nos permiten transmitir las acciones que soportan las estructuras de hormigón prefabricado a la cimentación por medio de elementos verticales de sección constante o variable, rectangular o circular, teniendo en cuenta que en las esquinas de fachada podemos fabricar semicirculares y, en obras singulares, cualquier sección que se requiera.

En edificaciones de varias alturas suele ser necesario realizar nudos rígidos para obtener estabilidad del edificio en todas las direcciones, para lo cual se dejan en ellos los accesorios necesarios para que el modelo estructural cumpla con todos los últimos estados límite y de servicio exigidos por la normativa vigente.

Algunos ejemplos más utilizados de pilares prefabricados son:

Pilares prefabricados rectangulares

Las secciones cuadrada y rectangular son las más utilizadas debido a su gran versatilidad para el resto de la estructura, siendo además las más sencillas en su fabricación y por lo tanto las más económicas.

En función de la longitud del pilar y de las plantas de forjado que soporte, se estudia la manera de optimizar la sección del pilar, fabricándolo en una, dos ó más piezas, ejecutando la unión entre plantas con sistemas atornillados, obteniendo un resultado técnico idéntico a un pilar fabricado monolíticamente.

Dentro de esta tipología de pilares, a la hora de su fabricación, se distinguen varios tipos según el diseño de apoyo con los elementos horizontales a la hora de componer una estructura.



Figura 10. Pilar prefabricado rectangular. Fuente: ALVE

Pilares prefabricados circulares

Los pilares circulares de hormigón prefabricado son utilizados habitualmente en espacios destinados al estacionamiento dado que se aprovechan los espacios evitando los ángulos. Su fabricación requiere un proceso más elaborado. En función de la longitud del pilar de hormigón prefabricado y de las plantas de forjado que soporte, estudiamos la manera de optimizar la sección del pilar, fabricándolo en una, dos o más piezas, ejecutando la unión entre plantas con sistemas atornillados, obteniendo un resultado técnico idéntico a un pilar fabricado monolíticamente.

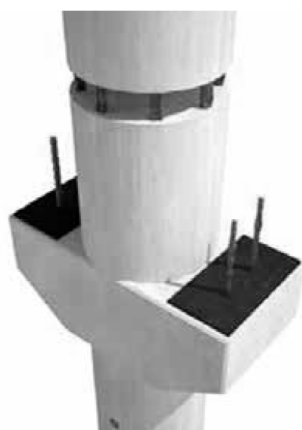


Figura 11. Pilar prefabricado circular. Fuente: Tecnyconta

Pilar esquinero

Debido a las uniones entre elementos estructurales que hay que llevar a cabo en esta construcción, surge este tipo de pilar, el cual une un muro con otro en una esquina. Con un acabado semicircular su uso permite una equilibrada distribución de las cargas.

En función de la longitud del pilar y de las plantas de forjado que soporte, se estudia la manera de optimizar la sección del pilar, fabricándolo en una, dos ó más piezas, ejecutando la unión entre plantas con sistemas atornillados, obteniendo un resultado técnico idéntico a un pilar fabricado monolíticamente.

Por otro lado, otro elemento característico de la construcción con elementos prefabricados son los paneles.

La forma de estos paneles prefabricados es una consideración económica importante que se tiene en cuenta. Un factor significativo puede ser si el panel es abierto o cerrado.⁴

⁴ Novas Cabrera. J. A (2010)

1.2 Ciclo de vida del hormigón

El hormigón atraviesa un ciclo de vida complejo que se inicia con la extracción de materias primas y culmina con su disposición final en obra. Cada etapa de este ciclo conlleva impactos ambientales y socioeconómicos significativos, los cuales deben ser considerados para promover prácticas de construcción más sostenibles. La industria de la construcción y la edificación ambiental son los principales consumidores de recursos, energía y materiales.

El resultado principal del estudio es que el cemento Portland ordinario contribuye más intensamente al calentamiento global (GWP)⁵ y la creación de oxidantes en comparación con los áridos. En este contexto, otra investigación importante, con implicaciones nacionales, es propuesta por en un estudio en el cual se analizan los impactos ambientales de la industria de los agregados en el contexto italiano, a través de una evaluación comparativa de las cargas ambientales de las cadenas productivas de áridos naturales y reciclados. (Faleschini et al., 2016).

Por otro lado, examinan los impactos ambientales entre el hormigón de áridos naturales y el hormigón de agregados reciclados en China. (Ding et al., 2016)

Dentro de la Unión Europea las edificaciones se estiman que consumen aproximadamente el 40% de la energía total y también es responsable de aproximadamente el 30% de emisiones de CO₂, y genera aproximadamente el 40% de los residuos producidos por el hombre.⁶

Es por ello que se analiza cuáles son los impactos ambientales del ciclo de vida del hormigón, que se pueden describir como los siguientes:

- Emisiones de gases de efecto invernadero: la producción de cemento y el transporte son las principales fuentes de emisiones.
- Consumo de energía y agua: la extracción de materias primas, la producción de cemento y el transporte requieren grandes cantidades de energía y agua.
- Generación de residuos: la demolición y la producción de hormigón generan grandes cantidades de residuos.
- Contaminación del aire, suelo y agua: las emisiones de partículas y gases durante la producción y el uso del hormigón pueden contaminar el aire, mientras que los residuos pueden contaminar el suelo y el agua.

Para reducir estos impactos ambientales que generan el desarrollo y uso del hormigón, se están desarrollando diversas estrategias, como:

- Cemento bajo en carbono: utilizando materiales alternativos y optimizando los procesos de producción.

Su principal valor es aportar información útil para la elección adecuada de las mejores soluciones técnicas a cada proyecto, teniendo en cuenta no sólo los impactos que derivan de la fabricación y uso de recursos en su construcción, sino también aquéllos que devendrán en la etapa de servicio y deconstrucción.⁷

⁵ Global Warming Potential

⁶ Colangelo, F., Petrillo, A., Cioffi, R., Borrelli, C., & Forcina, A. (2017)

⁷ Manjunatha, M., Preethi, S., Malingaraya, N., Mounika, H., Niveditha, K., & Ravi, N. (2021).

Se identifican algunos de los atributos distintivos del hormigón que le confieren un perfil óptimo en comparación con otros materiales de construcción sustitutos.

Este material destaca por generarse como recurso local, ya que sus insumos y procesos de producción suelen ser de origen local, lo que reduce significativamente las distancias de transporte y, por ende, los impactos asociados.

Además, este material es 100 % reciclable, lo que lo convierte en una opción sostenible para la construcción. En cuanto a la huella de carbono, entre el 80 % y el 90 % de esta está relacionada con la etapa de uso de las edificaciones y hoy en día, las soluciones basadas en cemento aportan alternativas de alta eficiencia energética, gracias a contribuciones como la masa térmica, que mejora el rendimiento energético.

El (ACV)⁸ del cemento y el hormigón no solo permite identificar oportunidades para reducir la huella de carbono, sino también mejorar su sostenibilidad y productividad a través de decisiones operacionales y de diseño capaces de extender su vida útil, ser conscientes con las necesidades de la sociedad, y valorizar los residuos. En este sentido, es crucial encontrar un balance, por un lado, tener iniciativas como el uso de áridos reciclados (ARH)⁹ o la sustitución de materias primas por residuos industriales como áridos y/o materiales cementicios suplementarios (MCSs)¹⁰, y por el otro, optimizar las propiedades del cemento y el hormigón sin comprometer su desempeño estructural ni sus propiedades características.

De acuerdo con la gráfica de “Concrete NZ Building Resilience”, entidad que analiza el impacto del hormigón en Nueva Zelanda, el Análisis del Ciclo de Vida del Hormigón se compone de cuatro grandes etapas.¹¹



Figura 12. Ciclo de vida del hormigón. Fuente: Concrete NZ Building Resilience

⁸ Análisis del Ciclo de Vida

⁹ Áridos reciclados del hormigón

¹⁰ Materiales Cementicios Suplementarios

¹¹ Manjunatha, M., Preethi, S., Malingaraya, N., Mounika, H., Niveditha, K., & Ravi, N. (2021).

1.2.1 Estudio actual de estructuras prefabricadas

1. Extracción y procesos constructivos (A1-A5)

Etapa que comprende desde la selección de materias primas hasta la fabricación con hormigón. En esta etapa se consideran los impactos en el uso de áridos naturales, la incorporación de materiales cementicios suplementarios (MCSs), ¹²uso de áridos artificiales o reciclados, transporte, fabricación del cemento, uso de aditivos, manufactura, diseño de mezclas, utilización y reutilización del agua, hormigones de retorno, y construcción con hormigón. Se trata de la etapa de mayor cantidad de decisiones, las cuales determinan la vida útil del material, su desempeño estructural, y su viabilidad para extender su ciclo de vida.

2. Utilización de lo construido (B)

En esta segunda gran etapa se consideran el uso de la infraestructura, su mantenimiento, reparación, reemplazo y remodelación, además del uso operacional de los suministros de agua y la energía que se requieren para ser habitado. Se trata del periodo de menor cantidad de emisiones de carbono a lo largo del ciclo de vida del hormigón, y donde el mayor impacto proviene de la forma en que se utiliza la infraestructura.

Las decisiones previas en cuanto a su construcción determinarán en gran medida el tiempo de vida útil que tenga. Sus procedimientos de reparación, rehabilitación y mantención estructural permitirán extender ese tiempo.

3. Final de la vida (C1-C4)

Una vez que la infraestructura termina su vida útil, pasa a la etapa de demolición y deconstrucción. Incluye los procesos de traslado de los desechos y procesamiento de residuos. En la mayoría de los casos el hormigón llega a este punto, quedando relegado a la categoría de escombros. Sin embargo, se ha progresado en la recuperación del hormigón como áridos reciclados, y según sus características y propiedades, se puede determinar su nueva utilidad, extendiendo su ciclo de vida.

4. Beneficios más allá de la vida útil del sistema (D)

En esta última etapa del ciclo, se contemplan la reutilización, reciclaje y revalorización del hormigón de desecho. Dentro de los principales desafíos de esta categoría, está el de incorporar un correcto proceso de acopio de los materiales de demolición evitando la contaminación con otros residuos. De esta manera, es posible separar el hormigón de acuerdo con sus características y propiedades, para utilizarlo de la forma más idónea.¹³

Por estos motivos es vital explorar alternativas más sostenibles que abarquen diversas dimensiones del hormigón, tales como uso de nuevas tecnologías que mejoren su desempeño y productividad, que puedan minimizar su impacto medioambiental y aprovechar los beneficios que tengan de acuerdo los requerimientos de cada proyecto.

¹² Materiales Cementicios Suplementarios

¹³ Manjunatha, M., Preethi, S., Malingaraya, N., Mounika, H., Niveditha, K., & Ravi, N. (2021).

1.2.2 Vida útil del hormigón

Un aspecto crucial en la vida útil del hormigón es la re carbonatación, proceso mediante el cual hasta un 25 % de la huella de carbono asociada a la producción del cemento consumido puede reabsorberse durante la vida útil del servicio de las edificaciones. Puede llegar a ampliarse mediante estrategias de captación de carbono tras la vida útil del material. Además, las soluciones de hormigón requieren menores o nulos mantenimientos, en comparación con otros materiales, lo que resulta un aspecto importante que no solo reduce costes, sino también la huella de carbono asociada al ciclo de vida.

Por último, se considera que la vida útil del hormigón puede ser considerablemente prolongada, superando incluso los requisitos establecidos por las normativas, lo que refuerza su sostenibilidad como material de construcción.¹⁴

La durabilidad del hormigón se define como la capacidad del material para mantener sus propiedades y resistir las condiciones químicas y físicas a las que está expuesto a lo largo de su vida útil. Este atributo resulta esencial, especialmente para construcciones que enfrentan los efectos de la intemperie, ya que los factores ambientales y las condiciones de uso contribuyen a su degradación inevitable. Por ello, en todo este proceso, la cuestión más relevante va a ser no es si el hormigón se degradará, sino cuándo comenzará este proceso, lo que destaca la importancia de su diseño.

A nivel proyecto y aplicado al desarrollo arquitectónico del mismo, desde el momento en que se proyecta una estructura, es crucial considerar los agentes ambientales agresivos que afectarán su durabilidad. Durante la fabricación de elementos de hormigón armado, se deben prevenir los efectos de degradación específicos, así como las estrategias de mantenimiento y, cuando sea necesario, la sustitución de piezas deterioradas. La planificación adecuada desde el diseño garantiza que la estructura pueda cumplir con las exigencias previstas a lo largo de su vida útil.

El hormigón ha demostrado ser uno de los materiales más duraderos, con ejemplos de estructuras que han permanecido en pie durante siglos. Aunque su vida útil suele estimarse en 100 años, algunas estructuras históricas que no contienen armaduras han alcanzado hasta 2.000 años con un deterioro mínimo. Sin embargo, la evaluación de la vida útil del hormigón abarca varios conceptos que deben analizarse.

En primer lugar, la vida útil de servicio, que es el período desde la ejecución de la estructura hasta que se presenta un deterioro significativo.

Por otro lado, la vida útil total que comprende desde la ejecución hasta el colapso completo de la obra. Por su parte, la vida residual se refiere al tiempo restante desde la última supervisión hasta que la estructura pierda su funcionalidad. La vida útil propiamente dicha comienza cuando se construye una estructura, más adelante un agente agresor rompe la barrera de protección del material, sin comprometer todavía la integridad de la estructura.

¹⁴ ANEFHOP, *Guía para la reducción de la huella de carbono*.

Finalmente, la vida útil prevista corresponde al período de tiempo para el cual la estructura fue diseñada, cumpliendo con requisitos de seguridad, funcionalidad y durabilidad. Finalmente, la vida útil prevista corresponde al período de tiempo para el cual la estructura fue diseñada, cumpliendo con requisitos de seguridad, funcionalidad y durabilidad¹⁵.

“El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta súper poderosa para tomar decisiones y comparar alternativas, particularmente para ir seleccionando las mejores opciones no solo desde el punto de vista técnico, sino también ambiental” (Díaz, et al., 2024)

1.2.2 Desafíos del reciclaje de residuos de construcción

El mayor desafío del reciclaje de residuos de construcción y demolición es la variabilidad e inconsistencia del material de alimentación. Un material de alimentación inconsistente puede dar lugar a productos de menor calidad.

Sin embargo, con la estrategia adecuada, combinando los equipos adecuados para el trabajo y el proveedor de equipos adecuado, las variabilidades e inconsistencias del proceso pueden afrontarse con flexibilidad.

Lo primero y más importante es entender que las plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición no están diseñadas para procesar materiales peligrosos. Se deben rechazar los residuos de construcción y demolición con contaminantes peligrosos. Las plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición están diseñadas para procesar residuos inertes, que son:

- Residuos que no sufren transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas.
- Residuos que no se disuelven, no se queman ni reaccionan física ni químicamente de ninguna otra forma que pueda dar lugar a contaminación ambiental o daños para la salud humana.
- Residuos que no ponen en peligro la calidad de las aguas superficiales o subterráneas por su lixiviabilidad total, su contenido en contaminantes y la ecotoxicidad de sus lixiviados¹⁶

El reciclaje de hormigón es un proceso mediante el cual los escombros de hormigón de estructuras demolidas se transforman en material reutilizable para nuevos proyectos de construcción. Este proceso comienza con la recolección de los residuos de hormigón, que posteriormente se transportan a una planta de reciclaje. Allí, el hormigón se somete a varias etapas de procesamiento, que suelen incluir la trituración, la clasificación y la eliminación de contaminantes.¹⁷

¹⁵ Díaz, V. M. (2024, 30 noviembre)

¹⁶ McLanahan Corporation. (2023, 5 junio)

¹⁷ AZoBuild. (2023). *How and Why Do We Recycle Concrete?*

Casi todos los tipos de hormigón se pueden reciclar. La posibilidad de reciclar diversos tipos de hormigón supone un avance significativo en las prácticas de construcción sostenible. No solo reduce la carga en los vertederos, sino que también ofrece una alternativa ecológica a la producción de nuevos materiales, en consonancia con los principios de la economía circular. Mediante el reciclaje del hormigón, la industria de la construcción puede reducir significativamente su huella ambiental al reducir la necesidad de nuevas materias primas y minimizar los residuos.

La presencia de materiales de refuerzo, como barras de acero, en el hormigón altera significativamente el proceso de reciclaje. Mientras que el hormigón no reforzado puede introducirse directamente en las trituradoras para su procesamiento, el hormigón reforzado requiere una fase inicial de extracción de metal. Este paso suele implicar mano de obra o el uso de electroimanes para extraer el metal, que posteriormente se recicla por separado.

Los pasos adicionales necesarios para la manipulación del hormigón armado pueden aumentar el tiempo y el coste del reciclaje. Sin embargo, los avances tecnológicos, como mejores métodos de clasificación y separación, han simplificado este proceso, haciendo que el reciclaje del hormigón armado sea más eficiente que antes.¹⁸

¹⁸ AZoBuild. (2023). *How and Why Do We Recycle Concrete?*

1.3 Impactos del hormigón

La industria del hormigón deja una profunda huella medioambiental, la cual genera aproximadamente el 7% de las emisiones mundiales de CO₂, principalmente por el proceso de calcinación aplicado para hacer cemento.

Según el ciclo de vida de este material constructivo, en las etapas más avanzadas una vez construida una estructura de hormigón armado empieza a absorber lentamente CO₂ de la atmósfera por medio del proceso de carbonatación. Se puede creer que de esa manera se compensa parte de las emisiones iniciales de CO₂, pero la carbonatación también reduce la alcalinidad del hormigón, por lo que el acero de su interior también es más proclive a la corrosión.

En una visión completa del ciclo de vida, los primeros años suelen influir en tan sólo cerca del 10 % del consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida completo, por tal motivo es fundamental adoptar decisiones correctas en términos de durabilidad, eficiencia térmica y resiliencia en vista a la etapa de servicio.

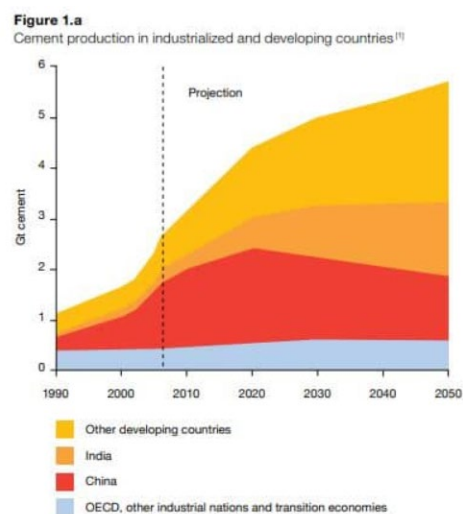
“En el tiempo que se tarda en leer esta frase, la industria global de la construcción habrá vertido más de 19.000 cubas de hormigón” (Seguí, et al., 2024)

En cuanto a la producción a nivel mundial de este material, el cemento, componente clave del hormigón y uno de los materiales más utilizados por el hombre, es ahora la piedra angular de la construcción global. Pero la producción de cemento tiene una huella masiva en las emisiones de CO₂.

Cada año se producen más de 4.000 millones de toneladas de cemento, lo que representa alrededor del 8% de las emisiones mundiales de CO₂.

Aun así, la rápida demanda de urbanización y desarrollo económico de regiones como el sudeste asiático y África subsahariana, aumentarán la demanda de nuevos edificios y, por lo tanto, de hormigón y cemento.¹⁹

Figura 13. Producción de cemento en países industrializados y desarrollados. Fuente: Artículo Impacto ambiental del hormigón. Ovacen



¹⁹ Seguí, P. (2024, 22 septiembre)

Actualmente, la realidad es que, a más población, más consumo de cemento y hormigón. Es por ello que China es la principal potencia en cuanto a densidad de población y capacidad de desarrollo de la industria de la construcción, por ello la población que genera mayor consumo de cemento y hormigón a nivel mundial.

El consumo de este material se estima que sea cerca de 150 toneladas por segundo. Según la Asociación Mundial del Cemento y el Hormigón (GCCA)²⁰, que reagrupa los datos de producción del sector, 14.000 millones de metros cúbicos de hormigón son usados cada año. La producción de cemento, genera cerca del 7% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂), según la GCCA, tres veces más que el tráfico aéreo.²¹

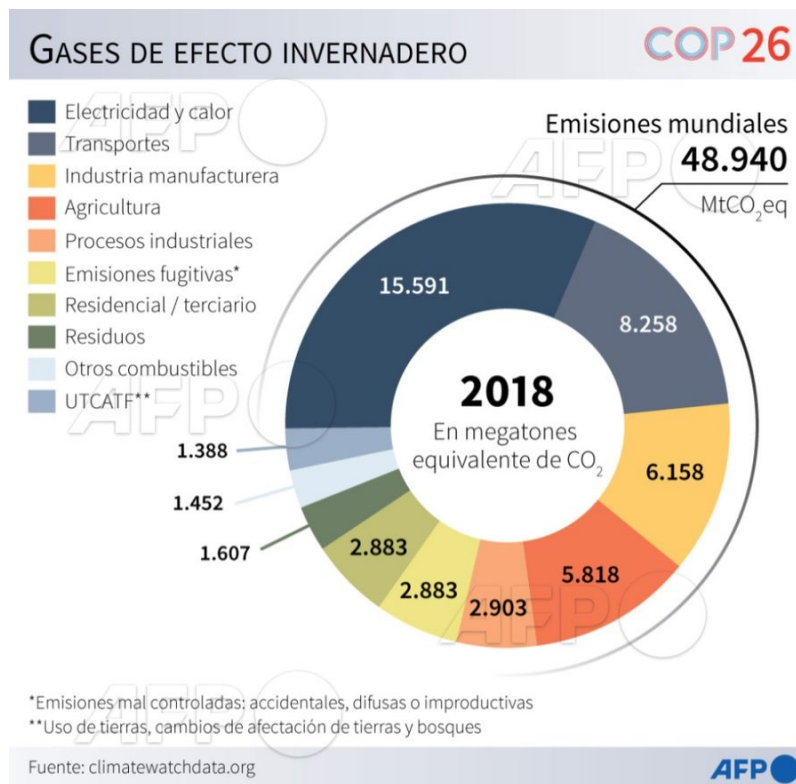


Figura 14. Clasificación por sector de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo en 2018. Gráfico. Fuente: AFP

²⁰ Global Cement and Concrete Association

²¹ Seguí, P. (2024, 22 septiembre)

1.3.1 Contribución a los impactos ambientales

Según la información previa aportada y analizada y con objetivo de avanzar en la profundización del tema de la investigación, se habla a continuación en concreto del hormigón prefabricado en este proceso de construcción y por tanto de contribución a los impactos medioambientales.

La prefabricación del hormigón, es hoy en día alternativa más destacada a la construcción in situ, emerge como una estrategia prometedora para mitigar este impacto ambiental.

Se analizan y se explorarán a continuación los principales factores que contribuyen a la huella de carbono del hormigón y cómo la prefabricación interviene en la reducción de estas emisiones.

Como bien antes mencionado, los principales factores de producción de la huella de CO2 del hormigón, se tienen en cuenta desde los procesos de fabricación del material puro y sus posteriores agregados mezclados y transportados para obtener el resultado final propio para la construcción.

Un factor diferenciador de la prefabricación del hormigón es no requerir del proceso de encofrado y desencofrado en obra el cual consume energía y por lo tanto genera un impacto ambiental al requerir de transporte y consumo energético asociados a este proceso.

El hormigón prefabricado ofrece una serie de ventajas significativas en la reducción de la huella de carbono en comparación con la construcción tradicional in situ.

Una ventaja significativa de la prefabricación es su capacidad para reducir drásticamente los residuos de construcción. En la construcción tradicional in situ, los materiales suelen solicitarse en exceso o manipularse de forma inadecuada, lo que genera residuos que inundan los vertederos y contribuyen a la degradación ambiental. En cambio, la construcción prefabricada se realiza en entornos controlados, donde los materiales se pueden medir, cortar y utilizar con precisión de forma más eficiente.

La capacidad de estandarizar los procesos de producción reduce el desperdicio de material hasta en un 90% en comparación con los métodos tradicionales.²²

La construcción prefabricada se refiere a la creación de elementos prefabricados que pueden fabricarse tanto en el sitio como fuera del mismo, mientras que la construcción prefabricada se refiere a los materiales de construcción prefabricados fuera del sitio. Los métodos de construcción prefabricada y prefabricada fueron promovidos por el gobierno de Hong Kong a principios de la década de 2000 como una medida para mejorar la seguridad y la calidad de la construcción (Chiang et al., 2006). Con el objetivo de acelerar la construcción de viviendas públicas, los materiales de hormigón prefabricado se adoptaron ampliamente debido a su durabilidad, rentabilidad y beneficios ambientales en comparación con materiales como el acero (Dabhade et al., 2009 ; Dong et al., 2015). Como se informó en Dong et al. (2015) , la mayoría de los edificios en Hong Kong se han construido con hormigón armado, mientras que los componentes de hormigón prefabricado y prefabricado se han adoptado ampliamente para edificios residenciales públicos y privados para adaptarse a las condiciones compactas del sitio.²³

²² Curtis Partition (2024) *The Environmental Impact of Prefabricated Construction*

²³ Rosana W.M. Wong, Becky P.Y. Loo. (2022)

A pesar de su reconocida eficacia en control de calidad y rapidez de instalación, el hormigón prefabricado tiene significativas limitaciones que deben considerarse en el entorno de la arquitectura. Su implementación requiere una considerable inversión inicial en infraestructuras y moldes, lo que la hace económicamente factible únicamente en proyectos de gran envergadura o con tipologías repetitivas. Crear componentes grandes y pesados requiere complicadas operaciones logísticas y el uso de grúas y transporte especializado, lo que aumenta los costos y retrasa los proyectos si la fábrica no está cerca del lugar de construcción. Una vez fabricadas, las piezas no tienen flexibilidad para cambios de última hora, por lo que cualquier ajuste de diseño o error en las medidas requiere rehacer completamente el componente. Asimismo, las uniones entre paneles necesitan sistemas de sellado y accesorios particulares; un tratamiento inadecuado resulta en filtraciones, puentes térmicos y dificultades de estanqueidad. Finalmente, aunque la manufactura en planta minimiza los residuos en el lugar, el uso de energía por prensas y hornos de curado, junto con el transporte de grandes bloques, puede aumentar la huella de carbono total en comparación con el vertido convencional en el sitio.

2. Metodología de trabajo

2.1 Alcance de la evaluación

La evaluación comparada se aplica a dos casos de estudio concretos. Estos casos son dos proyectos de arquitectura cedidos por el estudio Arhotek. Dentro de la edificación, se centra el estudio por un lado en el análisis de la vivienda, siendo objeto de estudio una vivienda unifamiliar aislada. Y, por otro lado, con fin de abarcar diferentes tipos edificatorios, se estudia el caso de una nave industrial. A cada uno de estos casos se aplican los dos modelos de construcción que se quieren comparar, el modelo 1 de construcción convencional in-situ y el modelo 2 de construcción con elementos prefabricados.

2.2 Desglose de estructura y mediciones

A partir de los planos de proyecto cedidos por el estudio, se ha desglosado la estructura de cada caso de estudio y se han calculado las mediciones en cuanto a cantidad de material empleado ya sea por m³ de hormigón en el caso de estructuras de hormigón in-situ o por kg de acero, en el caso de elementos metálicos. En el caso del modelo prefabricado la medición se hace por cada unidad de elemento.

2.3 Obtención de indicadores ambientales y uso de recursos

Una vez analizada y desglosada la estructura para ambos modelos de construcción, cada elemento constructivo tiene asociado una tabla de Indicadores de impacto ambiental y de Uso de recursos, obtenida a través de la aplicación CYPE, en concreto al generador de precios para obra nueva para obtener los datos concretos. Este programa, permite identificar cada uno de los elementos según sus características y muestra por cada partida de obra valores como energía incorporada y emisiones de CO₂, desglosados por materiales, maquinaria, envases y residuos.

El módulo basa su análisis en la normativa UNE-EN ISO 14040/44, cubriendo etapas A1–A5 del ciclo de vida: extracción, fabricación, transporte e instalación. Especialmente en España, los datos provienen directamente de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) aportadas por fabricantes incluidos en la base de datos.

El desglose se encuentra en el *Anexo 1. Mediciones* y *Anexo 2. Características e Impactos ambientales*.

2.4 Análisis y comparación de resultados

Cada gráfico muestra los valores de impacto ambiental sumatorio de las etapas del ciclo de vida:

- A1: Suministro de materias primas
- A2: Transporte de materias primas
- A3: Fabricación de producto
- A4: Transporte del producto
- A5: Proceso de construcción e instalación

2.4.1 Impacto ambiental

Por un lado, se van a analizar y comparar las gráficas de impacto ambiental para los cinco indicadores principales de cada elemento de construcción.

1. **GWP** (Potencial de calentamiento global) CO₂ eq. (kg)
2. **ODP** (Potencial de agotamiento de la capa de ozono) CFC
3. **AP** (Potencial de acidificación del suelo y agua) SO₂, eq. (kg)
4. **EP** (Potencial de eutrofización) (PO₄)₃ eq. (kg)
5. **POCP** (Potencial de formación de ozono troposférico) etileno eq. (kg)

2.4.2 Uso de recursos

Y, por otro lado, las gráficas de uso de recursos para los tres principales indicadores de cada elemento de construcción.

1. **PERT** (Energía prima renovable) MJ
2. **PENRT** (Energía prima no renovable) MJ
3. **FW** (Uso total de agua dulce) m³

3. Resultados

3.1 Presentación de los casos de estudio

En este capítulo se presentan los edificios que se han escogido para evaluar su construcción con ambos modelos. Se analizan los elementos principales de la estructura los cuales luego serán desarrollados, las principales características del edificio y los criterios para escoger qué proyecto evaluar.

Se trata en ambos casos de dos proyectos cedidos por el estudio de arquitectura Arhotek, por los arquitectos Javier Pinilla Melo y Francisco Esteban Aguado. Son escogidos con el objetivo de seguir con la dinámica de desarrollo de la investigación y poder dar un planteamiento final a esos proyectos ya desarrollados en la actividad profesional desde un punto de vista que se acerque al análisis consecuente de la construcción.

CASO 1: VIVIENDA UNIFAMILIAR

En primer lugar, el caso 1 de vivienda unifamiliar aislada. Se trata de una construcción moderna de dos alturas. Con una superficie construida de 147 m² en planta con estructura convencional in-situ y paneles prefabricados en fachada.

El proyecto, objeto de estudio se ubica en un solar en Torrelodones, Madrid con fácil entrada para los equipos de obra. Estos datos resultan relevantes de tener en cuenta a la hora de desarrollar el supuesto proceso constructivo.

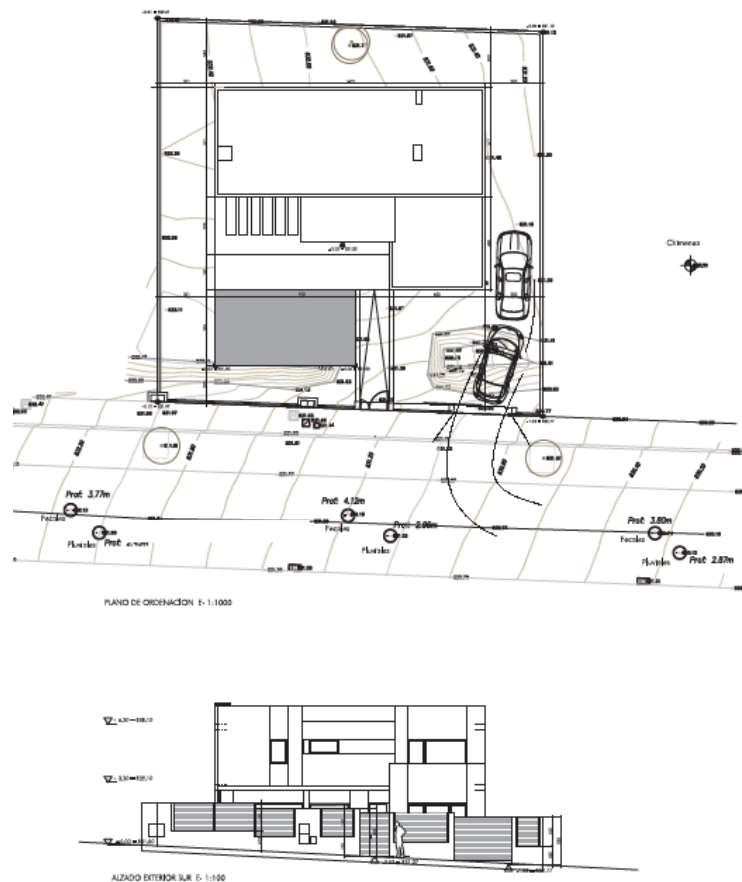


Figura 15. Plano de situación. Fuente: Arhotek

Esta vivienda, está distribuida en planta de tal forma que consta de un volumen rectangular, con espacios exteriores de jardín y porche, así como garaje particular. En planta baja se disponen espacios abiertos para las zonas comunes de salón y cocina y una habitación. En planta primera se configura el espacio alrededor de un distribuidor a doble altura.

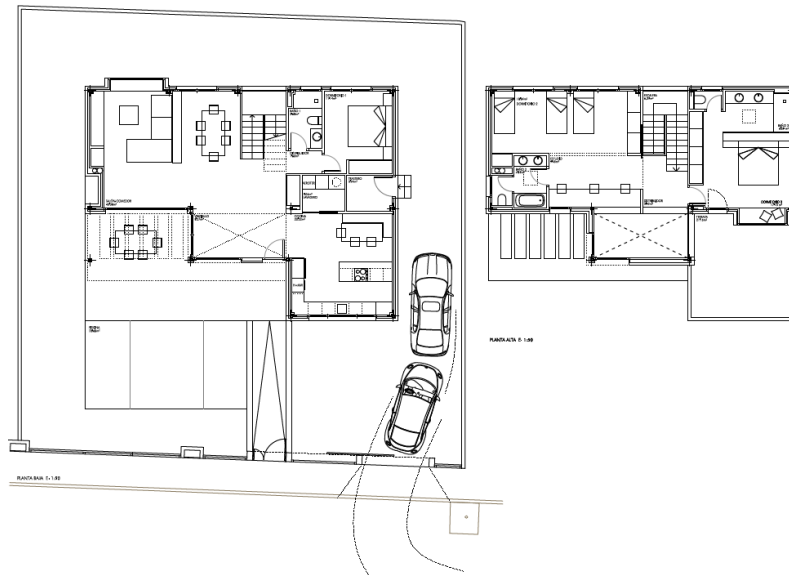


Figura 16. Plano de arquitectura. Fuente: Arhotek

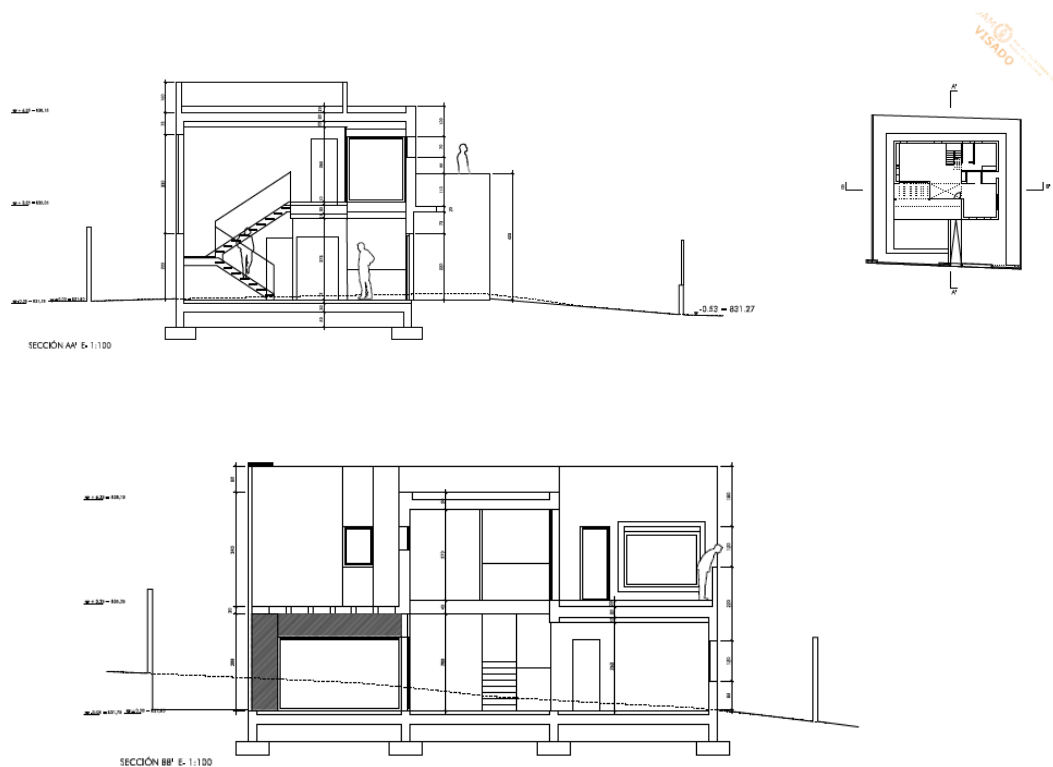


Figura 17. Sección de arquitectura 1. Fuente: Arhotek

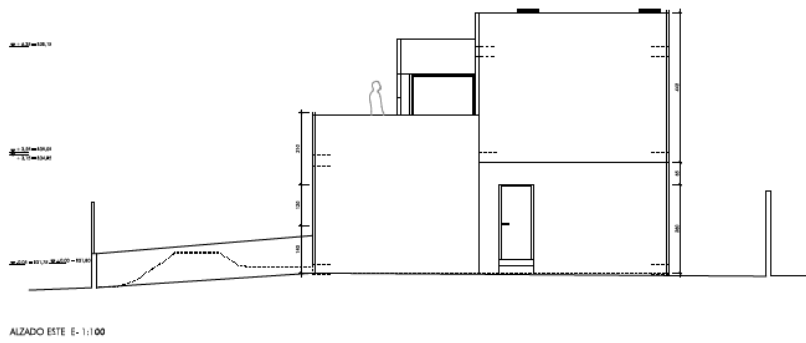
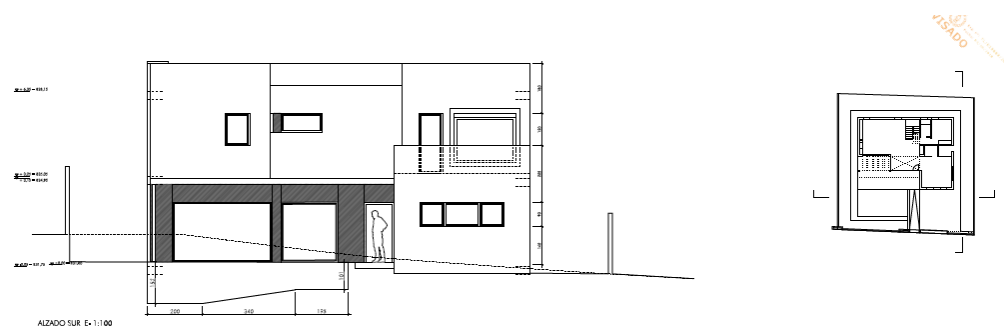


Figura 18. Sección de arquitectura 2. Fuente: Arhotek

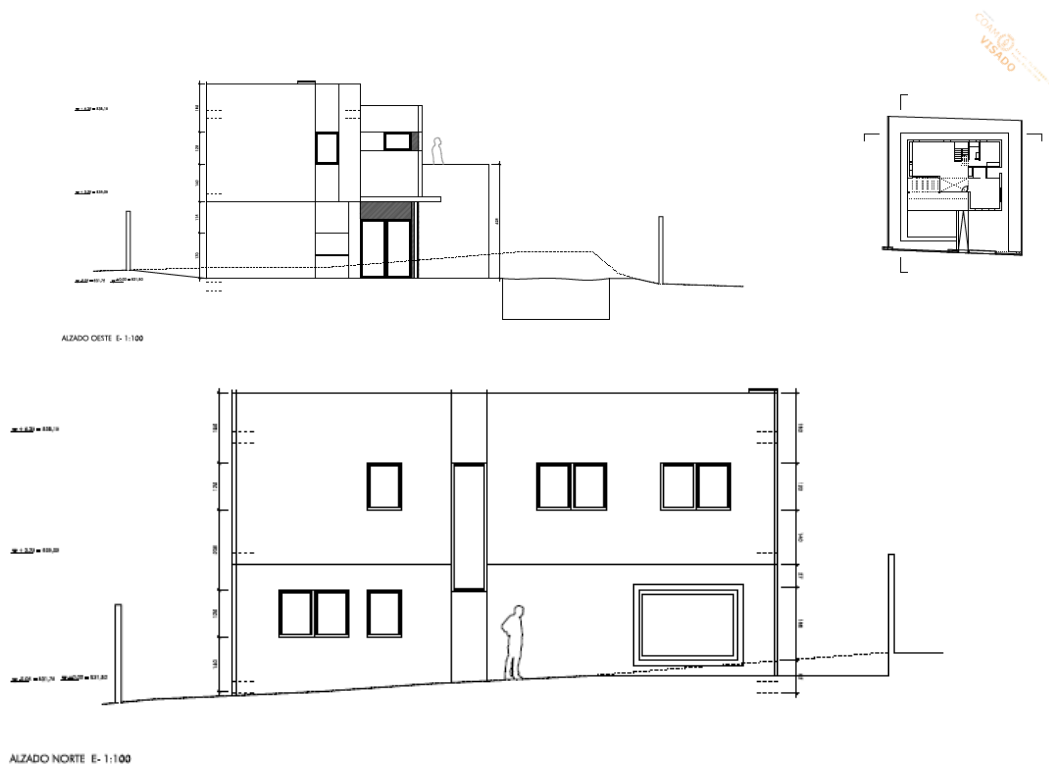


Figura 19. Sección de arquitectura 3. Fuente: Arhotek

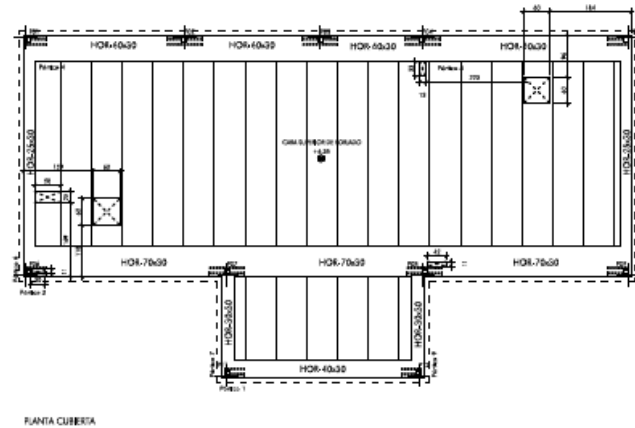


Figura 22. Plano de forjado de cubierta. Fuente: Arhotek

CASO 2: NAVE INDUSTRIAL

En segundo lugar, se estudia el caso de la nave industrial, un edificio de gran envergadura y construcción industrializada. En este caso, se trata también de un proyecto realizado por el mismo estudio, Arhotek del arquitecto Javier Pinilla Melo y Francisco Esteban Aguado.

Este proyecto se trata de una ampliación de una nave industrial existente, el edificio se ubica en Alcalá de Henares, en una zona industrial que cuenta con fácil acceso para los equipos necesarios para la construcción de este.

La altura total del nuevo edificio son 13 m, siendo la altura de la primera planta 7,50 m y la de la segunda 5,50 m. Y con una entreplanta en el ala oeste de 3,05 m de altura.

El siguiente plano muestra el plano de ampliación con la nueva arquitectura marcada en rojo, la cual va a ser analizada más adelante para la comparativa.

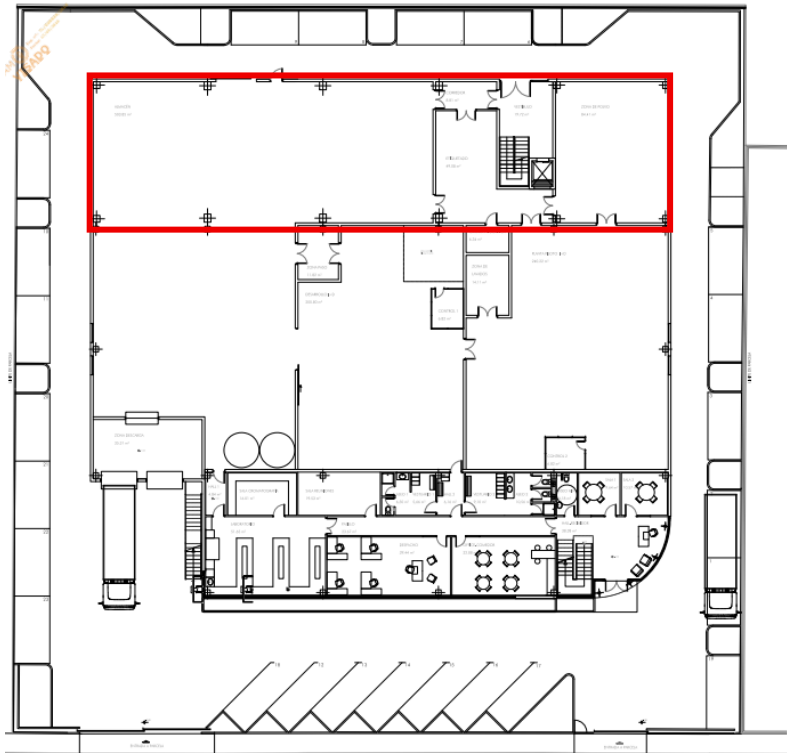


Figura 23. Planta baja estado ampliado. Fuente: Arhotek

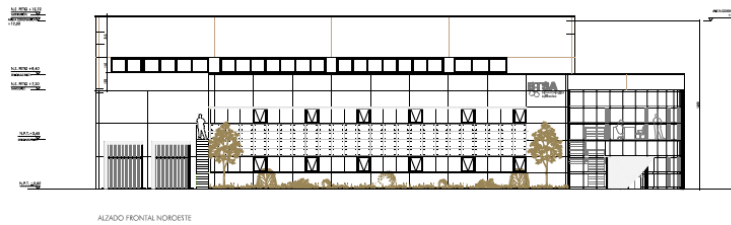


Figura 24. Alzado noroeste. Fuente: Arhotek

Esta nave se distribuye en planta de tal forma que consta de un volumen prácticamente cuadrado exceptuando el alzado noroeste y con espacios a dobles alturas totalmente diáfanos proyectados para el trabajo que se lleva a cabo en la nave. En planta baja se disponen en el ala noreste espacios de oficinas y laboratorios, esta zona cuenta con el espacio de entreplanta y planta primera. El resto de la nave son espacios diáfanos de áreas de trabajo y trabajo piloto. Cuentan con la doble altura de la entreplanta.

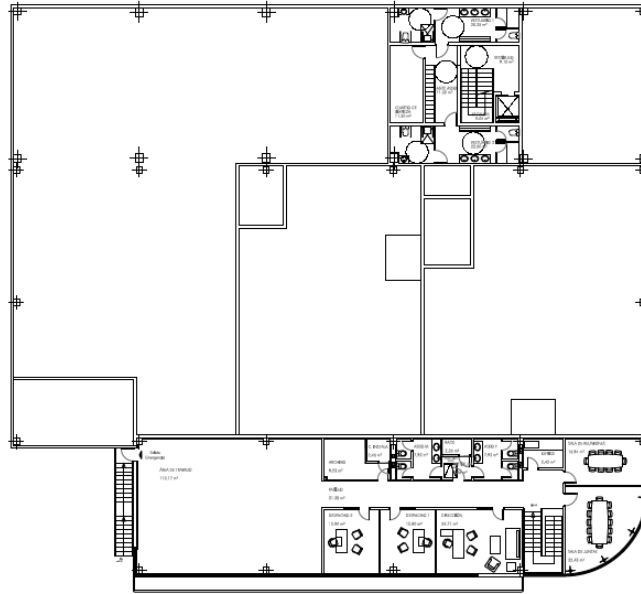


Figura 25. Entreplanta. Fuente: Arhotek

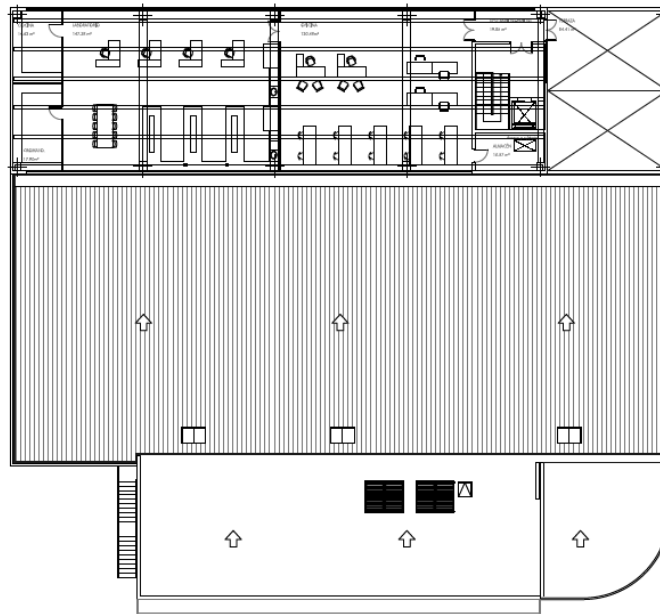


Figura 26. Planta primera. Fuente: Arhotek

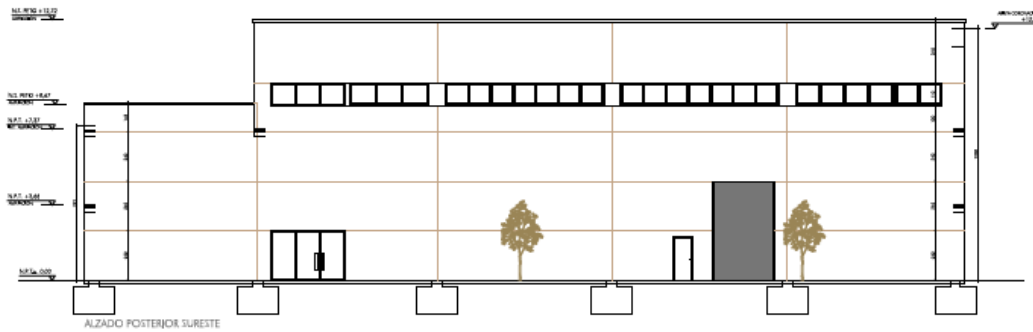


Figura 27. Alzado posterior sureste. Fuente: Arhotek

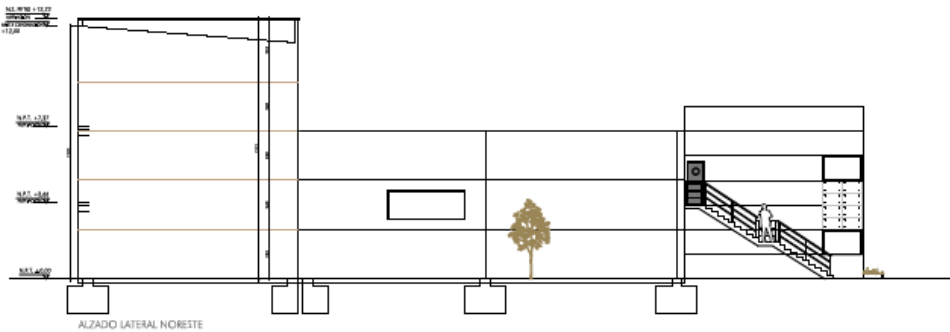


Figura 28. Alzado lateral noreste. Fuente: Arhotek

En cuanto al análisis de la estructura, se analiza solo la parte de la ampliación en este caso, la cimentación se planteó con zapatas cuadradas y vigas de atado, los pilares prefabricados con un sistema de pernos Peikkos, los forjados de placas de hormigón prefabricado y la fachada de paneles prefabricados modulares prefabricados.

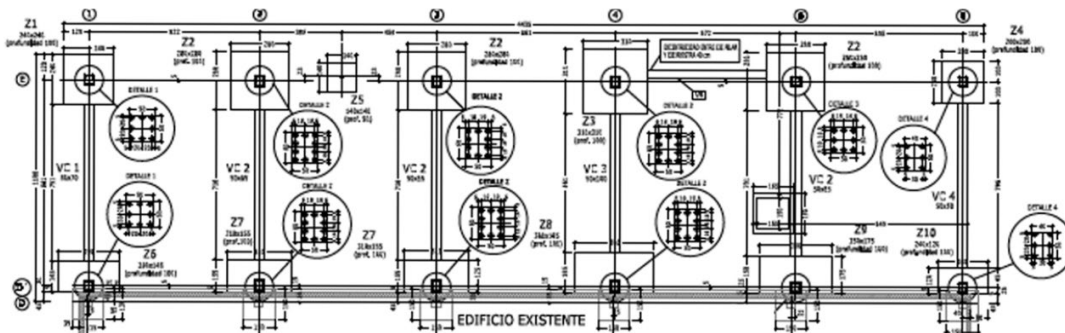


Figura 29. Plano de cimentación. Fuente: Arhotek

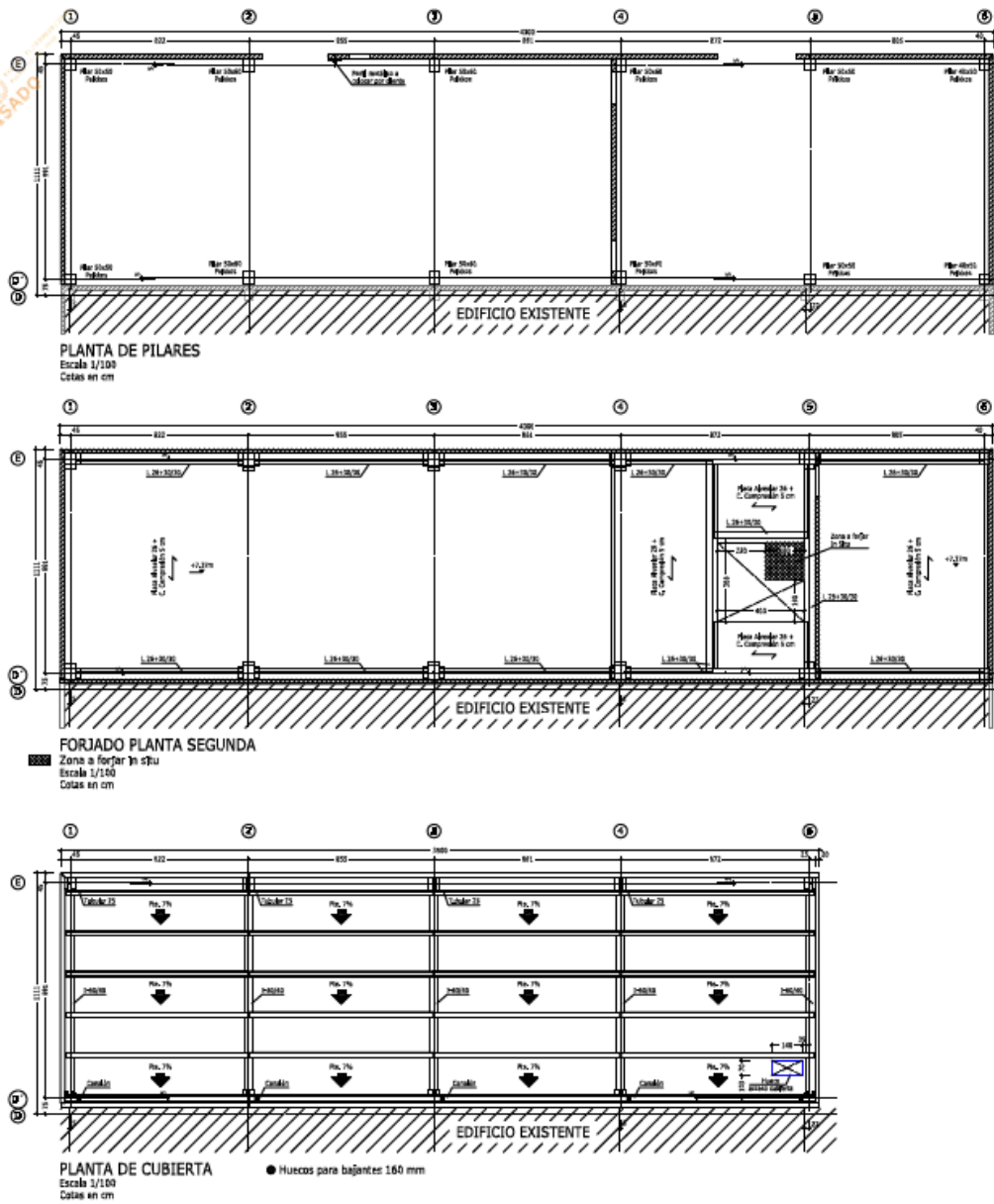


Figura 30. Planos de estructura. Fuente: Arhotek

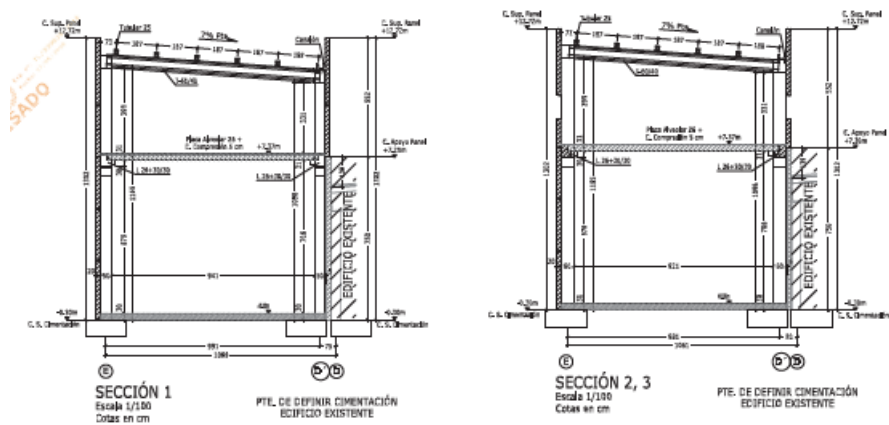


Figura 31. Secciones de estructura. Fuente: Arhotek

3.2 Comparativa de modelos

CASO 1: VIVIENDA UNIFAMILIAR

Se comparan dos modelos de construcción para el mismo proyecto, por un lado, se plantea una construcción en su totalidad con elementos in situ. Y, por otro lado, se plantea una construcción con elementos prefabricados.

En concreto, los elementos de cimentación se van a considerar en ambos casos de construcción in-situ, pues no se obtienen valores para la prefabricación de estos y con el objetivo de acercarse lo máximo a un proceso constructivo realista el cual no consideraría emplear elementos de cimentación prefabricados.

Se ha realizado una medición de la cantidad de material y elementos necesarios para cada uno cuyo resumen es el siguiente.

El desglose de la medición se encuentra en el *Anexo 1. Mediciones*.

MODELO 1: CONSTRUCCIÓN IN-SITU					
Categoría	Elemento	Unidad	Cantidad	Material	Observaciones
Cimentación	Zapatas	m3	38,72	hormigón	8 zapatas; 1 zapata = 4.84 m3; dim. 1.10×1.10×0.50 m
Cimentación	Vigas de atado	m3	9,796	hormigón	15 vigas de atado
Estructura vertical	Pilares metálicos	kg	2300,95	acero	Perfiles UPN 120, UPN 140, UPN 160 y HEB 200
Estructura horizontal	Vigas y zunchos de hormigón armado	m3	17,27	hormigón	20 vigas
Estructura horizontal	Forjado unidireccional de viguetas pretensadas	m2	128,15	hormigón HA-25 arcilla hueca hormigón de alta resistencia	
Fachada	Fachada ventilada de fábrica de ladrillo	m2	244,18	ladrillo perforado lana de roca ladrillo cara vista macizo	

MODELO 2: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA					
Categoría	Elemento	Unidad	Cantidad	Material	Observaciones
Cimentación	Zapatas	m3	38,72	hormigón	8 zapatas; 1 zapata = 4.84 m3; dim. 1.10×1.10×0.50 m
Cimentación	Vigas de atado	m3	9,796	hormigón	15 vigas de atado
Estructura vertical	Pilares prefabricados de hormigón	unidades	25	hormigón de alta resistencia	Sección 0.40×0.40 m
Estructura horizontal	Vigas de hormigón prefabricado	m	134,64	hormigón de alta resistencia	20 vigas
Estructura horizontal	Forjado de placas alveolares	m2	128,15	hormigón de alta resistencia hormigón HA-25	
Fachada	Fachada de paneles prefabricados	m2	244,18	hormigón de alta resistencia hormigón HA-25 lana de roca	

CASO 1 . VIVIENDA UNIFAMILIAR


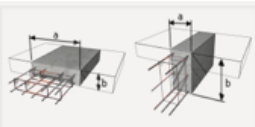

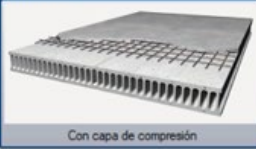
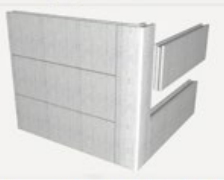
	MODELO 1: CONSTRUCCIÓN IN-SITU	MODELO 2: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA
CIMENTACIÓN	  <p>Zapatas de hormigón y vigas de atado</p>	  <p>Zapatas de hormigón y vigas de atado</p>
ESTRUCTURA VERTICAL	<p>Tipo de perfil</p> <p><input checked="" type="radio"/> Simple</p> <p><input type="radio"/> Compuestas</p> <p><input type="radio"/> Empalmadas</p>  <p>Tipo de perfil</p> <p><input checked="" type="radio"/> Perfiles laminados en caliente</p> <p><input type="radio"/> Perfiles huecos conformados en frío</p> <p><input type="radio"/> Perfiles huecos acabados en caliente</p>  <p>Pilares metálicos (IPE, HEB)</p>	 <p>Pilar prefabricado de hormigón</p>
ESTRUCTURA HORIZONTAL	 <p>Anchura "a" (cm) 40</p> <p>Carto "b" (cm) 60</p> <p>Vigas de hormigón</p>	<p>Tipo de viga</p> <p><input checked="" type="radio"/> T invertida</p> <p><input type="radio"/> L</p> <p><input type="radio"/> I</p>  <p>Vigas prefabricadas de hormigón</p>
	<p>Tipo de zuncho</p> <p><input checked="" type="radio"/> De apoyo de forjado</p> <p><input type="radio"/> De borde de forjado</p>  <p>Zunchos de hormigón</p>	
	<p>Viguetas</p> <p><input checked="" type="radio"/> Simple</p> <p><input type="radio"/> Doble</p>  <p>Forjado unidireccional</p>	<p>Losas de placas alveolares</p>  <p>Con capa de compresión</p> <p>Forjado de placas alveolares</p>
FACHADA	 <ol style="list-style-type: none"> 1. Hoja principal 2. Subestructura soporte 3. Aislamiento térmico 4. Revestimiento exterior <p>Hoja principal de fábrica de ladrillo</p>	<p>Paneles prefabricados</p> <p>Montaje</p> <p><input checked="" type="radio"/> En posición horizontal</p> <p><input type="radio"/> En posición vertical</p>  <p>Fachada de paneles prefabricados de hormigón</p>

Figura 32. Tabla comparativa caso 1. Fuente: elaboración propia

CASO 2: NAVE INDUSTRIAL

Se comparan dos modelos de construcción para el mismo proyecto, en primer lugar, una construcción en su totalidad con elementos prefabricados, como en el caso original del proyecto y por otro lado con un modelo de construcción in-situ.

Al igual que en el caso anterior, los elementos de cimentación se van a considerar en ambos casos de construcción in-situ, pues no se obtienen valores para la prefabricación de estos y con el objetivo de acercarse lo máximo a un proceso constructivo realista el cual no consideraría emplear elementos de cimentación prefabricados.

El desglose de la medición se encuentra en el *Anexo 1. Mediciones*.

MODELO 1: CONSTRUCCIÓN IN-SITU					
Categoría	Elemento	Unidad	Cantidad		Observaciones
Cimentación	Zapatas	m3	72,23	hormigón	12 zapatas; 1 zapata = 5,76 m3; dim. 2,40x2,40x1,0 m
Cimentación	Vigas de atado	m3	17,35	hormigón	6 vigas de atado
Estructura vertical	Pilares metálicos	kg	15096	acero	Perfiles HEB 300
Estructura horizontal	Vigas y zunchos de hormigón armado	m3	14,3	hormigón	Sección 0,3x0,4
Estructura horizontal	Viga de cubierta	kg	6799	acero	IPN 60/40x9,91; Tubular 25
Estructura horizontal	Forjado reticular	m2	504,1	hormigón HA-25 poliestireno expandido	
Fachada	Fachada ventilada de fábrica de ladrillo	m2	1062,32	ladrillo perforado lana de roca ladrillo cara vista macizo	

MODELO 2: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA					
Categoría	Elemento	Unidad	Cantidad	Material	Observaciones
Cimentación	Zapatas	m3	72,23	hormigón	12 zapatas; 1 zapata = 5,76 m3; dim. 2,40x2,40x1,0 m
Cimentación	Vigas de atado	m3	17,35	hormigón	6 vigas de atado
Estructura vertical	Pilares prefabricados de hormigón	unidades	24	hormigón de alta resistencia	Secciones: 0,4x0,5;0,5x0,5;0,5x0,6
Estructura horizontal	Vigas y zunchos prefabricados de hormigón	m	149,38	hormigón de alta resistencia	Viga en L 0.26+0,30x0,30
Estructura horizontal	Viga de cubierta	kg	6799	acero	IPN 60/40x9,91; Tubular 25
Estructura horizontal	Forjado de placas alveolares	m2	504,1	hormigón de alta resistencia hormigón HA-25	
Fachada	Fachada de paneles prefabricados	m2	1062,32	hormigón de alta resistencia hormigón HA-25 lana de roca	

CASO 2. NAVE INDUSTRIAL


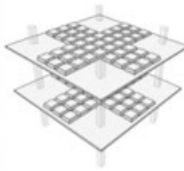

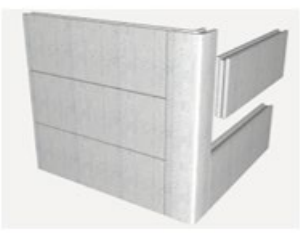
	MODELO 1: CONSTRUCCIÓN IN-SITU	MODELO 2: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA
CIMENTACIÓN		
		
	Zapatas de hormigón y vigas de atado	Zapatas de hormigón y vigas de atado
ESTRUCTURA VERTICAL		
		
	Pilares metálicos	Pilares prefabricados de hormigón
ESTRUCTURA HORIZONTAL		
		
	Zuncho de hormigón armado	Vigas prefabricadas de hormigón
ESTRUCTURA HORIZONTAL		
		
	Vigas metálicas en cubierta	Vigas metálicas en cubierta
ESTRUCTURA HORIZONTAL		
		
	Forjado reticular de casetones	Forjado de placass alveolares Con capa de compresión
FACHADA		
		
	Hoja de fachada de fabrica de ladrillo	Fachada de paneles prefabricados de hormigón

Figura 33. Tabla comparativa caso 2. Fuente: elaboración propia

3.3 Gráficos de impactos

Una vez analizada y desglosada la estructura para ambos métodos, cada elemento constructivo tiene asociado una tabla de Indicadores de Impacto ambiental y de Uso de recursos.

Estos datos junto con la memoria de cálculo previamente desarrollada nos permiten obtener los siguientes resultados.

El desglose se encuentra en el *Anexo 2. Características e Impactos ambientales*

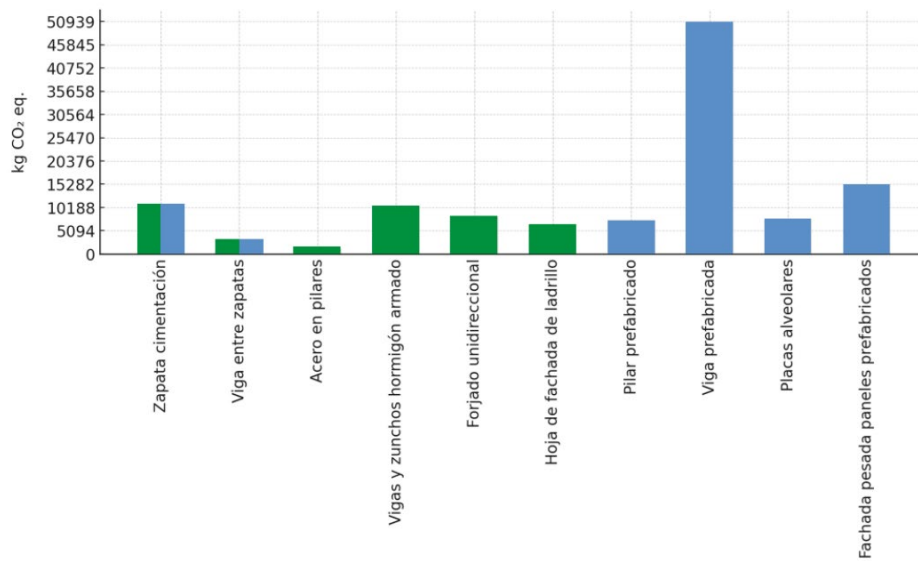
3.3.1 Caso 1: vivienda unifamiliar

Gráficas de impactos ambientales

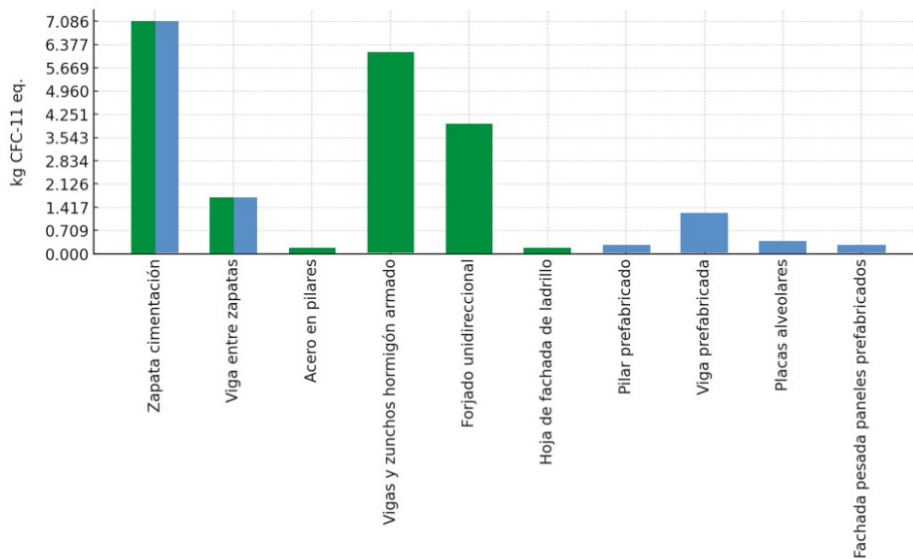
MODELO 1: CONSTRUCCIÓN IN-SITU (verde)

MODELO 2: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA (azul)

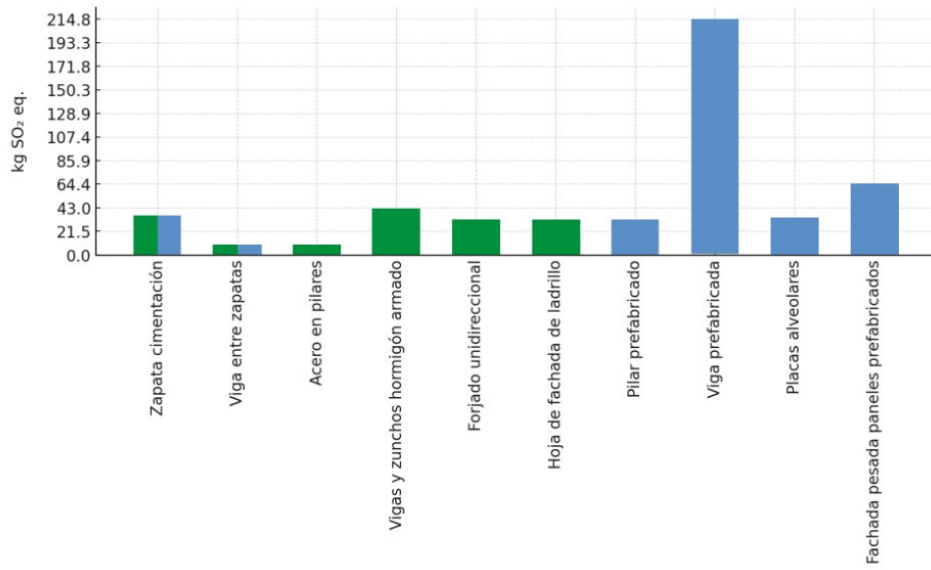
GWP (Potencial de calentamiento global) CO2 eq. (kg)



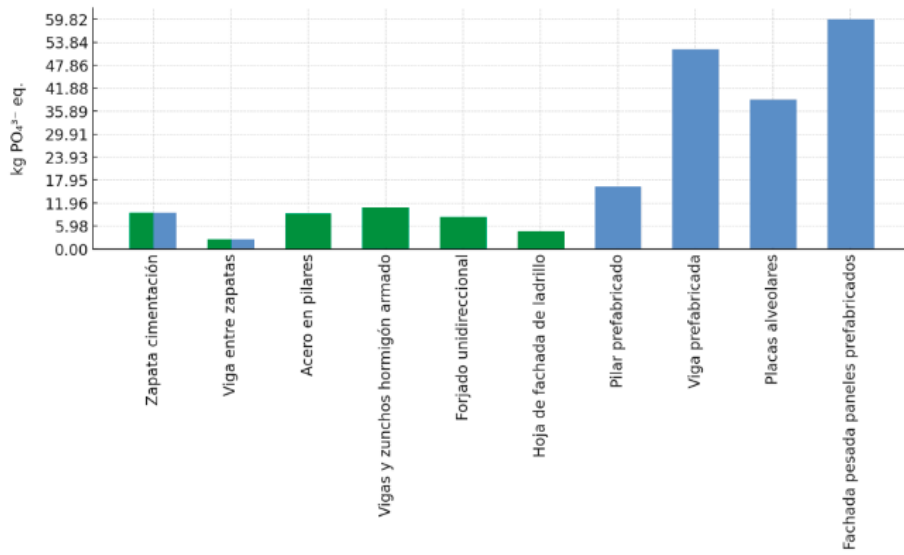
ODP (Potencial de agotamiento de la capa de ozono) CFC



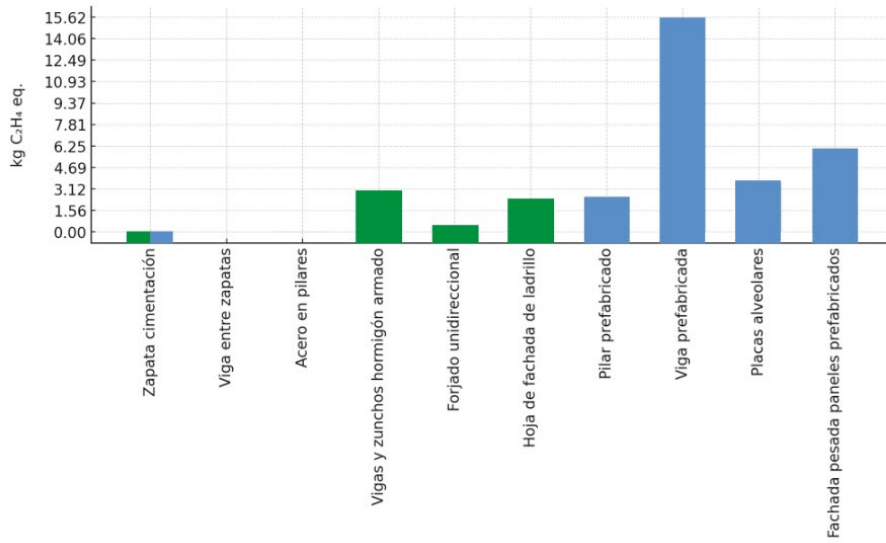
AP (Potencial de acidificación del suelo y agua) SO₂, eq. (kg)



EP (Potencial de eutrofización) (PO₄)₃ eq. (kg)



POCP (Potencial de formación de ozono troposférico) etileno eq. (kg)

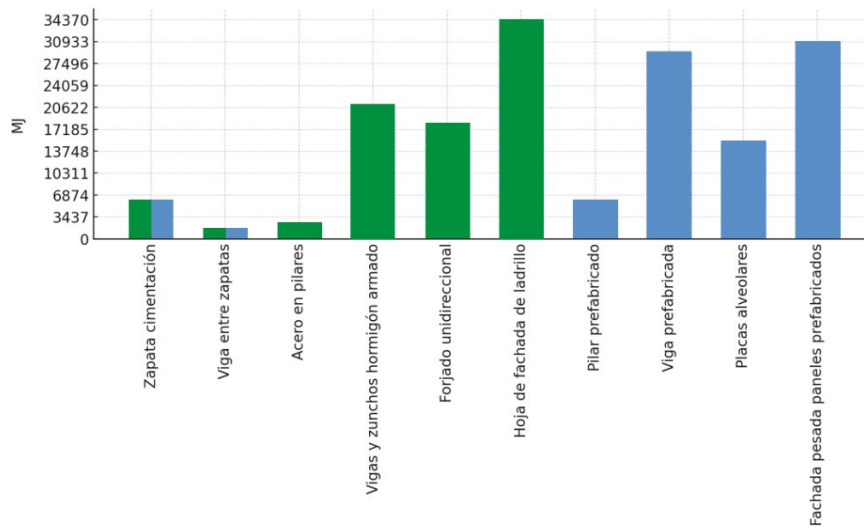


Gráficas de uso de recursos

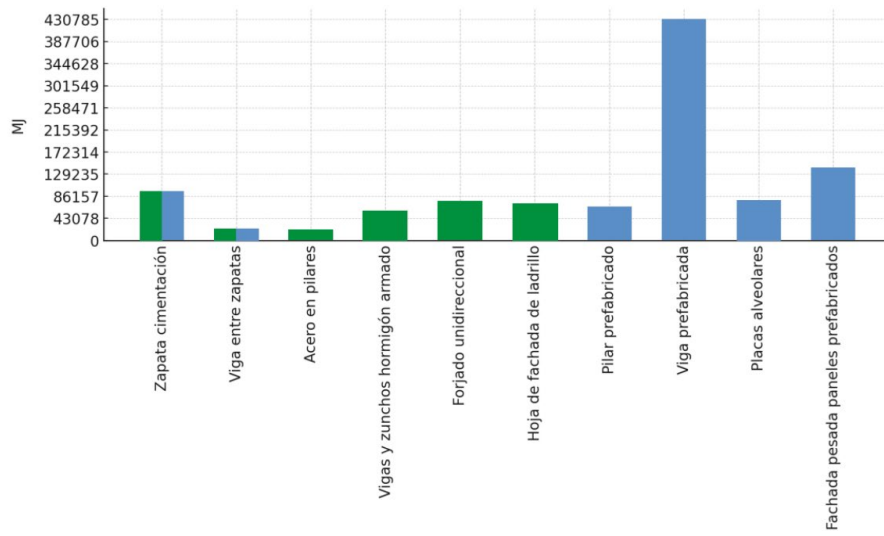
MODELO 1: CONSTRUCCIÓN IN-SITU (verde)

MODELO 2: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA (azul)

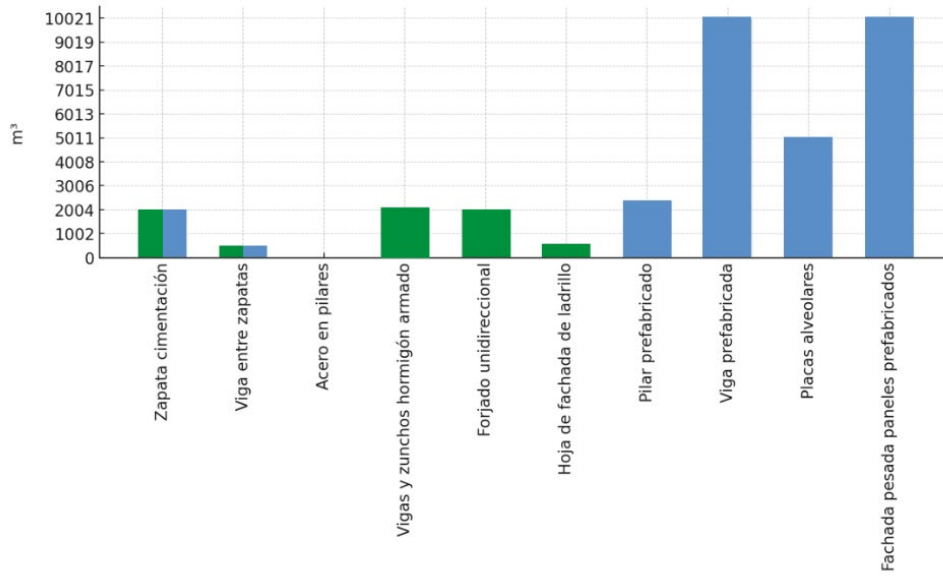
PERT (Energía primaria renovable) MJ



PENRT (Energía primaria no renovable) MJ



FW (Uso total de agua dulce) m³



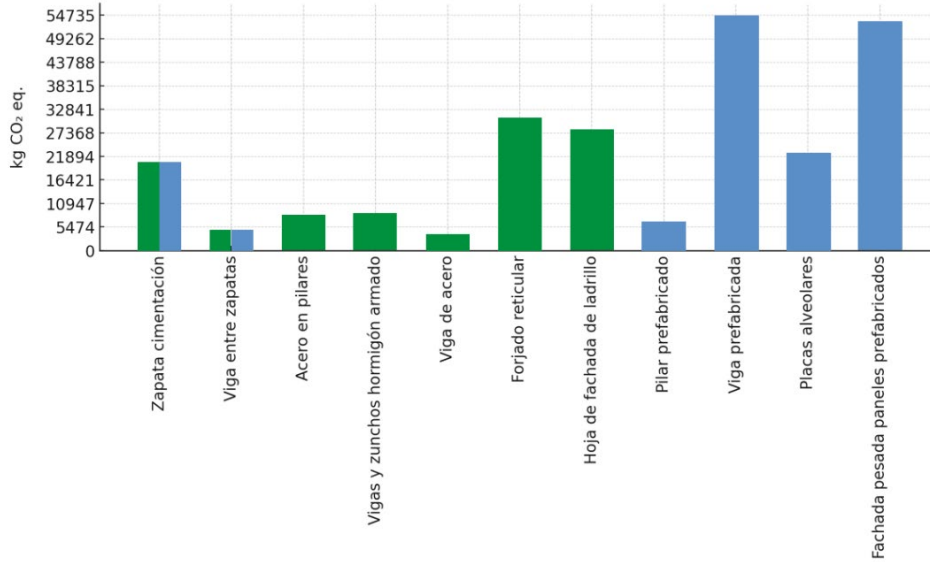
3.3.2 Caso 2: nave industrial

Gráficas de indicadores ambientales

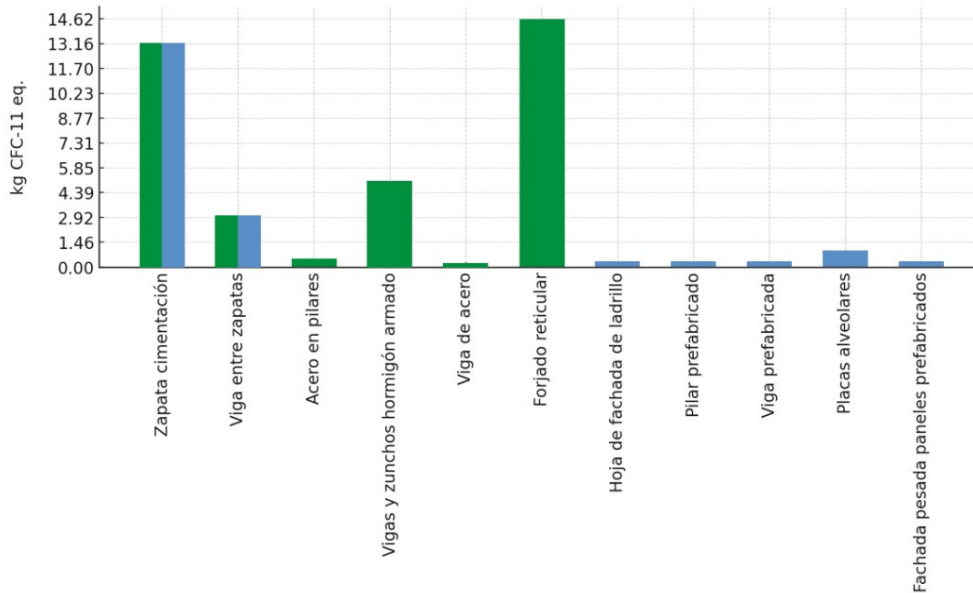
MODELO 1: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA

MODELO 2: CONSTRUCCIÓN IN-SITU

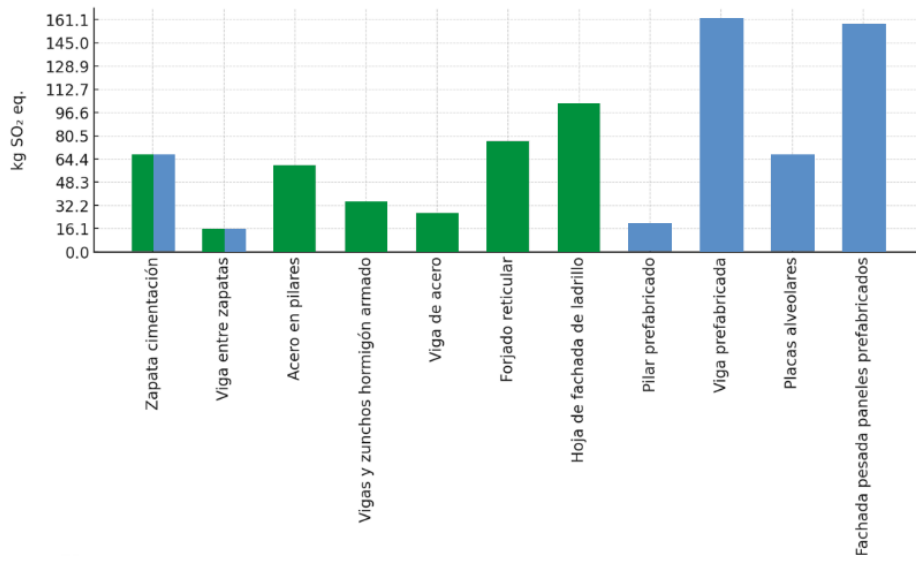
GWP (Potencial de calentamiento global) CO2 eq. (kg)



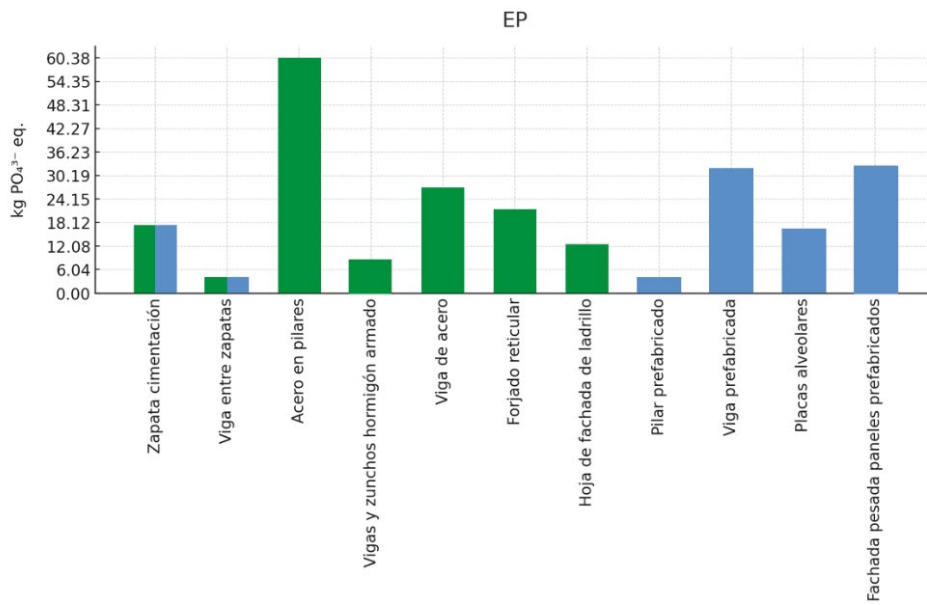
ODP (Potencial de agotamiento de la capa de ozono) CFC



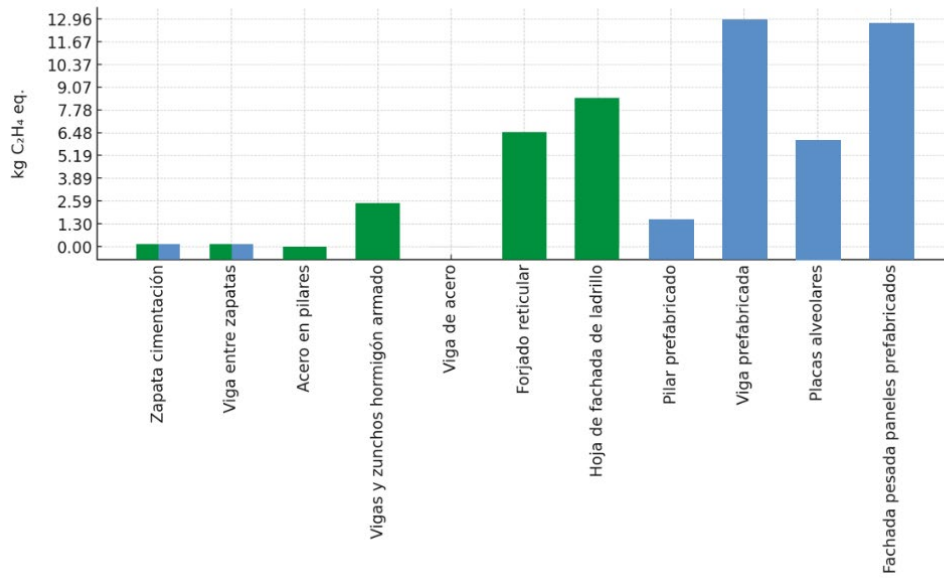
AP (Potencial de acidificación del suelo y agua) SO₂, eq. (kg)



EP (Potencial de eutrofización) (PO₄)₃ eq. (kg)



POCP (Potencial de formación de ozono troposférico) etileno eq. (kg)

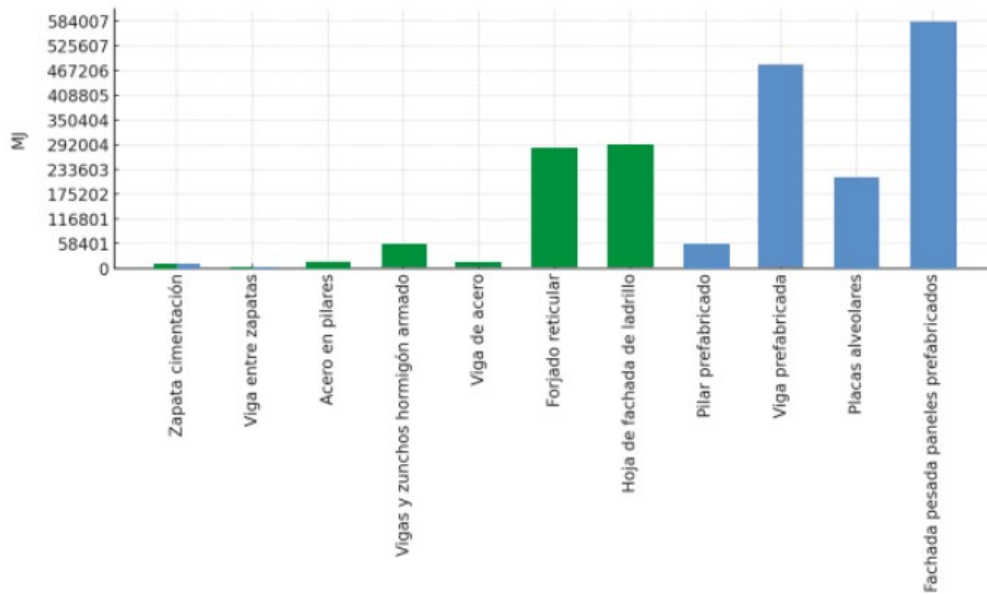


Gráficas de uso de recursos

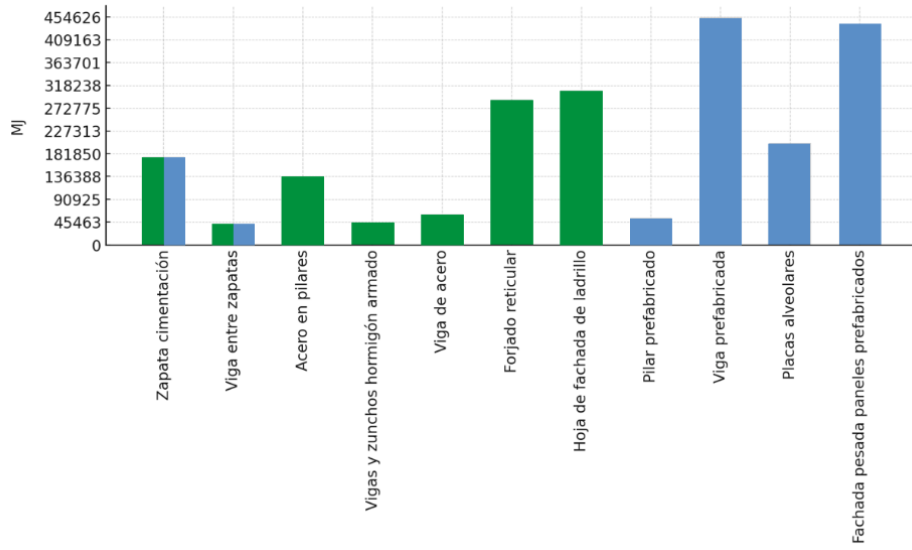
MODELO 1: CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA

MODELO 2: CONSTRUCCIÓN IN-SITU

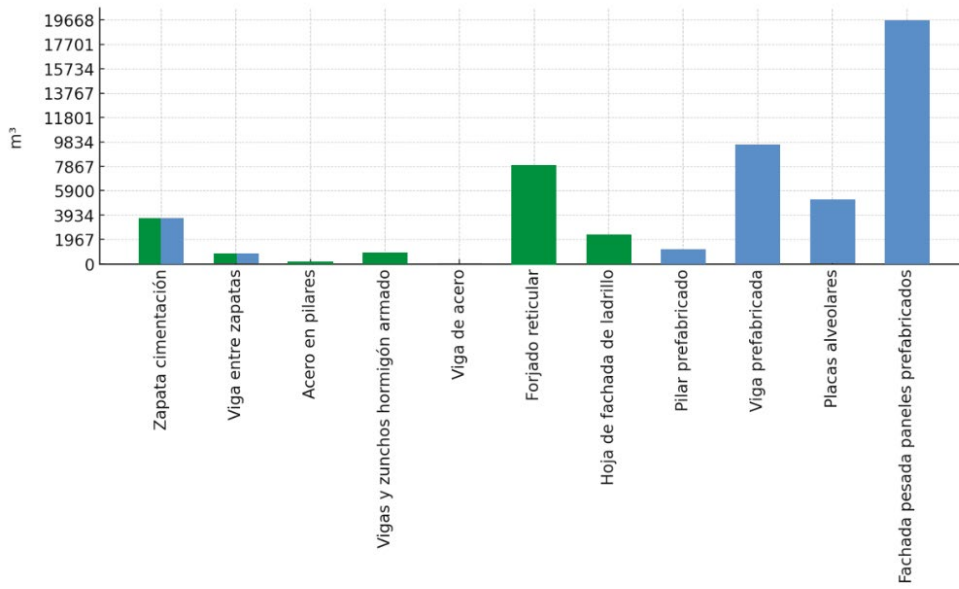
PERT (Energía primaria renovable) MJ



PENRT (Energía primaria no renovable) MJ



FW (Uso total de agua dulce) m3



4. Discusión

4.1 Caso 1: vivienda unifamiliar

Una vez obtenidos los resultados en gráficas y teniendo en cuenta las cantidades reales de cada material gracias a la medición de estructura, se comparan para obtener las conclusiones de todo el proceso. El objetivo es determinar cuál de los dos métodos constructivos presenta una menor huella ambiental en función de los materiales y elementos utilizados.

Impacto ambiental

GWP (Potencial de calentamiento global) (kg CO₂ eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** muestra un mayor impacto total de GWP
- Elemento con mayor impacto:
La **viga prefabricada** supera los 509.039 kg CO₂ eq., siendo el más contaminante en términos de huella de carbono.
- Elementos con menor impacto:
La **hoja de fachada de ladrillo y vigas entre zapatas de cimentación** muestran los valores más bajos

ODP (Potencial de agotamiento de la capa de ozono) (kg CFC 11 eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 1 construcción in-situ** tiene un impacto ligeramente mayor.
- Elementos con mayor impacto:
Las **zapatas** alcanzan 7.08 kg CFC 11 eq., siendo el de mayor impacto, seguido de las **vigas de hormigón armado in-situ**.
- Elementos con menor impacto:
La **hoja de fachada de ladrillo y los pilares metálicos** presentan los valores más favorables.

AP (Potencial de acidificación del suelo y agua) (kg SO₂ eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** acumula mayor impacto total.
- Elemento con mayor impacto:
La **viga prefabricada** alcanza 214.2 kg SO₂ eq., siendo con notable diferencia el elemento más impactante.
- Elementos con menor impacto:
Pilares metálicos y las vigas entre zapatas muestran impactos mínimos.

EP (Potencial de eutrofización) (kg PO₄³⁻ eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** presenta un mayor impacto en este indicador.
- Elemento con mayor impacto:
La **fachada de paneles prefabricados** es el más perjudicial con 59,82 kg PO₄³⁻ eq.,
- Elementos con menor impacto:
Las **vigas entre zapatas y la hoja de fachada de ladrillo** tienen una carga muy baja.

POCP (Potencial de formación de ozono troposférico) (kg etileno eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** es el de mayor impacto.
- Elemento con mayor impacto:
Viga prefabricada presenta el valor más elevado del conjunto.
- Elementos con menor impacto:
Vigas entre zapatas y pilares metálicos presentan los valores más bajos, próximos a cero.

Uso de recursos

PERT (Energía primaria renovable) MJ

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 1 construcción in-situ** consume más energía renovable, sin embargo, con una ligera diferencia del modelo de construcción prefabricada que muestra valores semejantes.
- Elemento con mayor impacto:
Hoja de fachada de ladrillo, consumiendo 34370 MJ
- Elementos con menor impacto:
Pilares metálicos y vigas entre zapatas.

PENRT (Energía primaria no renovable) MJ

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** mayor consumo de energía no renovable probablemente debido al uso intensivo de maquinaria, transporte y procesos industriales.
- Elemento con mayor impacto:
Marcando gran diferencia **la viga prefabricada** consumiendo 430.785 MJ
- Elemento con menor impacto:
Pilares metálicos

FW (Uso total de agua dulce) m3

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** mayor consumo de energía no renovable probablemente debido al uso intensivo de maquinaria, transporte y procesos industriales.
- Elementos con mayor impacto:
Tanto **la viga prefabricada** como **la fachada de paneles prefabricados**
- Elementos con menor impacto:
Pilares metálicos, con un impacto prácticamente nulo seguido de **la hoja de fachada de ladrillo**

4.2 Caso 2: nave industrial

Una vez obtenidos los resultados en gráficas y teniendo en cuenta las cantidades reales de cada material gracias a la medición de estructura, se comparan para obtener las conclusiones de todo el proceso. El objetivo es determinar cuál de los dos métodos constructivos presenta una menor huella ambiental en función de los materiales y elementos utilizados.

Impacto ambiental

GWP (Potencial de calentamiento global) (kg CO₂ eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada**, todos los elementos especialmente emiten más CO₂ cuando se fabrican en central y transportan.
- Elementos con mayor impacto:
La **viga prefabricada** y **la fachada de paneles prefabricados** en torno a 54735 kg CO₂ eq.,
- Elemento con menor impacto:
Las **vigas metálicas** en el modelo de construcción in-situ.

ODP (Potencial de agotamiento de la capa de ozono) (kg CFC 11 eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 1 construcción in-situ**, es considerablemente mayor que es modelo 2.
- Elementos con mayor impacto:
El **forjado reticular y las zapatas de cimentación**, son los que producen con diferencia mayor impacto.
- Elementos con menor impacto:
Todos los elementos empleados en el modelo 2 a excepción de las zapatas

AP (Potencial de acidificación del suelo y agua) (kg SO₂ eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** el cual concentra mayor acidificación en transporte y producción del hormigón.
- Elementos con mayor impacto:
La **viga prefabricada** y la **fachada de paneles prefabricados** alcanzan 161.10 kg SO₂ eq.
- Elementos con menor impacto:
Las **vigas entre zapatas** y los **pilares prefabricados** marcan la diferencia con un impacto 10 veces menor al mayor.

EP (Potencial de eutrofización) (kg PO₄³⁻ eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 1 construcción in-situ**, por las emisiones de nutrientes en fabricación de acero.
- Elemento con mayor impacto:
Los **pilares metálicos** son el elemento significativamente más impactante.
- Elemento con menor impacto:
Los **pilares prefabricados** en contrapartida son los menos contaminantes con un valor que se rebaja a una décima parte respecto a de mayor impacto.

POCP (Potencial de formación de ozono troposférico) (kg etileno eq.)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada**.
- Elementos con mayor impacto:
Las **vigas prefabricadas y los paneles prefabricados en fachada** con un valor de 12.96 kg etileno eq.
- Elemento con menor impacto:
Los **pilares metálicos** del modelo 1 con un valor prácticamente nulo.

Uso de recursos

PERT (Energía primaria renovable) MJ

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** consume más energía renovable.
- Elemento con mayor impacto:
Los **paneles prefabricados en fachada** requiere más MJ de energía renovable.
- Elementos con menor impacto:
Los **elementos de cimentación** y los **pilares y vigas de acero** registran el consumo más bajo.

PENRT (Energía primaria no renovable)

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** consume más energía no renovable.
- Elementos con mayor impacto:
Las **vigas prefabricadas** y los **paneles prefabricados de fachada**, los que más MJ de energía no renovable requieren.
- Elementos con menor impacto:
Las **vigas entre zapatas** y las **vigas y zunchos de hormigón** armado los que menos MJ de energía no renovable requieren.

FW (Uso total de agua dulce) m3

- Modelo con mayor impacto:
El **modelo 2 construcción prefabricada** utiliza más agua dulce, pues el sumatorio en varios elementos del modelo 1 es prácticamente nulo.
- Elemento con mayor impacto:
La **fachada de paneles prefabricados** es la que más agua consume.
- Elemento con menor impacto:
Los **pilares metálicos** prácticamente no requieren agua.

5. Conclusiones

5.1 Resumen Caso 1: vivienda unifamiliar

Indicadores ambientales

Indicador	Modelo con más impacto	Peor elemento	Mejores elementos	Fase con mayor impacto
GWP	Prefabricado	Viga prefabricada	Hoja de fachada de ladrillo y vigas entre zapatas	A1-A3
ODP	In-situ	Zapatas y vigas de hormigón armado	Hoja de fachada de ladrillo	A1-A3
AP	Prefabricado	Viga prefabricada	Pilares metálicos y vigas entre zapatas	A1-A3
EP	Prefabricado	Paneles prefabricados de fachada	Vigas entre zapatas y hoja de fachada de ladrillo	A1-A3
POCP	Prefabricado	Viga prefabricada	Pilares metálicos y hoja fachada de ladrillo	A1-A3

Uso de recursos

Indicador	Modelo con más consumo	Peor elemento	Mejores elementos	Fase con mayor impacto
PERT	In-situ	Hoja de fachada de ladrillo	Pilares metálicos y vigas entre zapatas	A1
PENRT	Prefabricado	Viga prefabricada	Pilares metálicos	A1-A3
FW	Prefabricado	Viga prefabricada	Pilares metálicos y hoja de fachada de ladrillo	A3

En general y a diferencia de lo que puede resultar más obvio, teniendo en cuenta todos los parámetros, se concluye que el modelo de construcción prefabricada resulta más desfavorable. De los ocho parámetros comparados y analizados, es en seis de ellos el modelo con más impacto, con lo que es significativamente más perjudicial.

Estas conclusiones sirven para contradecir y poner en duda los nuevos modelos de construcción basados en elementos prefabricados, los cuales a priori parecen ofrecer un avance respecto a la construcción convencional de hormigonado in-situ, sin embargo, la mayoría de elementos constructivos y en concreto como es obvio aquellos que consumen más material por su tamaño son considerablemente más impactantes en la capa de ozono debido a su alto consumo de recursos y gran impacto en su fase de fabricación.

Estos son sobre todo las vigas prefabricadas, que se construyen en secciones completas de varios metros por lo que su proceso de fabricación es bastante impactante en el medioambiente a la par que costoso. Por los mismos motivos, los suministros de materias primas que ocupan la primera etapa del proceso generan un impacto bastante elevado.

El transporte de estos elementos constructivos resulta más complejo que el transporte de un camión de hormigonado a obra, pues se requiere de numerosos trayectos y maquinaria para transportar los prefabricados más pesados y voluminosos.

5.2 Resumen Caso 2: nave industrial

Indicadores ambientales

Indicador	Modelo con más impacto	Peor elemento	Mejor elemento	Fase con mayor impacto
GWP	Prefabricado	Viga prefabricada y paneles prefabricados en fachada	Vigas metálicas	A1-A3
ODP	In-situ	Forjado reticular y zapatas	Estructura horizontal y vertical modelo 2	A1-A3
AP	Prefabricado	Viga prefabricada y paneles prefabricados en fachada	Pilares metálicos y vigas entre zapatas	A1-A3
EP	In-situ	Pilares metálicos	Pilares prefabricados	A1-A3
POCP	Prefabricado	Viga prefabricada y paneles prefabricados en fachada	Pilares metálicos	A1-A3

Uso de recursos

Indicador	Modelo con más consumo	Elemento más consumidor	Elemento menos consumidor	Fase con mayor impacto
PERT	Prefabricado	Paneles prefabricados en fachada	Cimentación y vigas y pilares de acero	A1
PENRT	Prefabricado	Viga prefabricada y paneles prefabricados en fachada	Vigas entre zapatas y vigas de hormigón armado	A1-A3
FW	Prefabricado	Paneles prefabricados en fachada	Pilares metálicos	A3

En este caso de estudio ocurre lo mismo que ya se ha visto en el anterior, en general y a diferencia de lo que puede resultar más obvio, teniendo en cuenta todos los parámetros, se concluye que el modelo de construcción prefabricada resulta más desfavorable por lo tanto genera más impacto ambiental y huella de CO₂.

En este caso de los ocho parámetros comparados y analizados, es también en seis de ellos el modelo con más impacto, con lo que es significativamente más perjudicial. Sin embargo, la comparativa de indicadores está ligeramente más compensada pues el modelo in-situ es más desfavorable en cuanto a los parámetros AP (Potencial de agotamiento de la capa de ozono) y EP (Potencial de eutrofización) los cuales resultan muy importantes debido a su agravante impacto en el medio ambiente.

Por otro lado, en cuanto a consumo de recursos, el modelo de construcción prefabricada es en todos los parámetros significativamente más impactante.

En un primer momento, se planteaban dos casos de estudio con el objetivo de poder comparar si la cantidad de impacto era equivalente a la cantidad de material empleado, sin embargo, aunque los elementos de este caso de estudio sean del tal tamaño que requerirían un proceso largo de hormigonado en obra además de maquinaria y mano de obra en el modelo 1, no supera el inmenso impacto que genera la prefabricación de tales elementos con tales características.

Concluyendo, los resultados obtenidos confirman algo que venimos viendo en la industria, el modelo prefabricado tal y como se diseña y se produce hoy no es necesariamente más sostenible en concreto si nos fijamos en las fases de producción de elementos (A1-A3). Se gana en rapidez y orden en obra, pero a coste de mayores emisiones de CO₂ y contaminantes, mayor consumo de energía no renovable y de agua industrial y una huella muy pronunciada en la etapa de fabricación.

6. Futuras líneas de investigación

Tras realizar este análisis comparativo y concluir con el perjudicial impacto que genera el modelo de construcción prefabricada, considero que algunas futuras líneas de investigación que sigan completando el trabajo serían, por un lado, incluir en los procesos comparados el uso, mantenimiento y fin de vida (reparación, demoliciones, reutilización de elementos) para evaluar la sostenibilidad a lo largo de toda la vida útil.

Por otro lado, y con el fin de implementar mejoras en este modelo constructivo, se podrían ensayar mezclas con cementos geo poliméricos, escorias o cenizas volantes para reducir impactos en A1-A3. Y comparar la prevalencia de hormigones ligeros o mezclas prefabricadas con agregados reciclados.

Para la optimización de procesos fabriles, implantar energías renovables en plantas como la fotovoltaica o la biomasa y recuperar aguas de lavado para rebajar PERT, PENRT y FW. Incluso diseñar prototipos de moldes reutilizables y líneas de producción modulares, cerca del punto de uso.

Por último, otra futura investigación sería la de generar modelos híbridos de construcción y ejecución, analizar soluciones mixtas en las que se puedan prefabricar solo los elementos de alto valor y ligeramente bajo impacto como las fachadas o losas ligeras y ejecutar in-situ los elementos de gran inercia por lo general los cimientos y la estructura vertical. Esto requeriría evaluar la viabilidad constructiva y el balance ambiental de las combinaciones.

FUENTES

Bibliografía y recursos digitales

(S/f). Europa.eu. Recuperado el 29 de diciembre de 2024, de <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>

Pérez, A. B. (2019). Optimización de estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).

Novas Cabrera, J. A. (2010). Sistemas constructivos refabricados aplicables a la construcción de edificaciones en países en desarrollo (Doctoral dissertation, Caminos).

Colangelo, F., Petrillo, A., Cioffi, R., Borrelli, C., & Forcina, A. (2017). Life cycle assessment of recycled concretes: A case study in southern Italy. *The Science Of The Total Environment*, 615, 1506-1517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.107>

Manjunatha, M., Preethi, S., Malingaraya, N., Mounika, H., Niveditha, K., & Ravi, N. (2021). Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials. *Materials Today Proceedings*, 47, 3637- 3644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.248>

Díaz, V. M. (2024, 30 noviembre). Centro UC Innovación del Hormigón - Análisis de Ciclo de Vida del Hormigón: Factor Clave para un futuro sostenible. <https://centrohormigon.uc.cl/actualidad/reportajes/931-analisisde-hormigon-factor-clave-para-un-futuro-sostenible>

Segui, P. (2024, 22 septiembre). Impacto ambiental del hormigón ¡Un material destructivo para la Tierra! OVACEN. https://ovacen.com/hormigon-materialdestructivo-tierra/#google_vignette.

CORCUERA S. Mónica (2009), Estudio de investigación para el desarrollo de viviendas sociales de bajo coste en la Ciudad de Lima-Perú. Universidad Politécnica de Catalunya. Tesis de Posgrado. Pág. 8

Páez, A. (1986). Hormigón armado. Reverté.

AZoBuild. (2023). *How and Why Do We Recycle Concrete?* AZoBuild. <https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8644>

Marcos, I., San José, J. T., Cuadrado, J., & Larrinaga, P. (2014). Las patentes en la introducción del hormigón armado en España: caso de estudio de la Alhóndiga de Bilbao. *Informes De La Construcción*, 66(534), e024. <https://doi.org/10.3989/ic.13.032>

Tecnyconta. (2019, 20 noviembre). ¿Construcción prefabricada o construcción en obra? TECNYCONTA. <https://www.tecnyconta.es/construccionprefabricada-in-situ>

Webmaster, & Webmaster. (2023, 1 febrero). Ciclo de vida del hormigón - Instituto del Cemento Portland. Instituto del Cemento Portland -. <https://icpa.org.ar/ciclo-de-vida-del-hormigon/>

Rengifo Cuenca, M. C., & Yupangui Cushicondor, R. V. (2013). Estudio del hormigón celular (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2013).

Fernández, S. (2024, 16 julio). Declaraciones ambientales ANDECE - ANDECE. ANDECE. <https://www.andece.org/declaraciones-ambientales-andece>

Sánchez Hurtado, J. F. (2010). Paneles prefabricados de hormigón en fachadas (Doctoral dissertation, Caminos).

Valenzuela Rosas, R. N. (2018). Evaluación de sistemas constructivos para edificios de mediana altura con elementos de hormigón prefabricado.

Fernández, L.(2023).Prefabricación de viviendas tras la Segunda Guerra Mundial (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Politécnica de Madrid.

Rosana W.M. Wong, Becky P.Y. Loo, Sustainability implications of using precast concrete in construction: An in-depth project-level analysis spanning two decades, *Journal of Cleaner Production*, Volume 378, 2022, 134486, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134486>.

McLanahan Corporation. (2023, 5 de junio). *Superar los desafíos del reciclaje de residuos de construcción y demolición: estrategias y soluciones* [Entrada en blog]. McLanahan. <https://www.mclanahan.com/es/blog/superar-los-desafios-del-reciclaje-de-residuos-de-construccion-y-demolicion-estrategias-y-soluciones>

Procedencia de las ilustraciones

Introducción

0.1. Figura Objetivo 55. Plan de la Unión Europea. Fuente: Consejo de la Unión Europea. Tomado de <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fitfor-55/> consultado el 21.10.2024.

Estado de la cuestión

02. Máquina usada para pretensar el hormigón. Fuente: weckenmann.com

03. Estructura de Eduardo Torroja. Acueducto en Tempul 1925. Fuente: <http://www.cehopu.cedex.es/>

04. Hormigón postensado. Fuente: es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Acero_postesado.

05. Vigas pretensadas de hormigón. Vigas puente. Fuente: Hormisur prefabricado de hormigón <https://www.hormisur.cl/infraestructura-vial.php>

06. Vigas delta de hormigón prefabricado. Fuente: TECNYCONTA <https://www.tecnyconta.es/vigas-prefabricadas-hormigon/viga-delta/>

07. Vigas TWIN de hormigón pretensado. Fuente: Hormipresa Archi/expo <https://www.archiexpo.es/prod/hormipresa/product-132241-1431919.html?srsltid=AfmBOooYEx-av2xJqQ6OTKBTA0KeAQ4RWXDMt4TgtQ8c3q8Wb4-AYr0L>

08. Estructura de elementos prefabricados. Fuente: Hormipresa Archi/expo https://www.archiexpo.es/prod/hormipresa-132241.html?srsltid=AfmBOopXwGbjJgHAMczNYPo9ZPnk7nSzoUnHXPN_JATzDpObeHHyTUGl

09. Piezas huecas pretensadas. Vigas hueso. Fisac, M (1970)

10. Pilar prefabricado rectangular. Fuente: TECNYCONTA <https://www.tecnyconta.es/pilares-prefabricados/rectangulares/>

11. Pilar prefabricado circular. Fuente: TECNYCONTA <https://www.tecnyconta.es/pilares-prefabricados/circulares/>

12. Ciclo de vida del hormigón. Fuente: Concrete NZ Building Resilience <https://centrohormigon.uc.cl/actualidad/reportajes/931-analisis-de-ciclode-vida-del-hormigon-factor-clave-para-un-futuro-sostenible>

13. Producción de cemento en países industrializados y desarrollados. Fuente: Artículo Impacto ambiental del hormigón. Ovacen <https://ovacen.com/> hormigon-material-destructivo-tierra/

14. Clasificación por sector de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo en 2018. Gráfico. Fuente: <https://www.climatewatchdata.org/AFP>

Metodología

15. Plano de situación. Fuente: Arhotek
16. Plano de arquitectura. Fuente: Arhotek
17. Sección de arquitectura 1. Fuente: Arhotek
18. Sección de arquitectura 2. Fuente: Arhotek
19. Sección de arquitectura 3. Fuente: Arhotek
20. Plano de cimentación. Fuente: Arhotek
21. Plano de forjado planta primera. Fuente: Arhotek
22. Plano de forjado de cubierta. Fuente: Arhotek
23. Planta baja estado ampliado. Fuente: Arhotek
24. Alzado noroeste. Fuente: Arhotek
25. Entreplanta. Fuente: Arhotek
26. Planta primera. Fuente: Arhotek
27. Alzado posterior sureste. Fuente: Arhotek
28. Alzado lateral noreste. Fuente: Arhotek
29. Plano de cimentación. Fuente: Arhotek
30. Planos de estructura. Fuente: Arhotek
31. Secciones de estructura. Fuente: Arhotek

Resultados

32. Tabla comparativa caso 1. Fuente: elaboración propia
33. Tabla comparativa caso 2. Fuente: elaboración propia

