



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Evaluación de impacto ambiental de materiales de construcción

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

Autor: Víctor García Cruz
Director: Ramón Pamies Porras
Codirector: Susana García Sanfélix

Cartagena, julio de 2021



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. EL CEMENTO	5
3.1. LA HISTORIA DEL CEMENTO.....	7
3.2. PRODUCCIÓN DE CEMENTO.....	8
3.3. CEMENTOS VERDES.....	9
3.3.1. El uso de cenizas volantes procedentes del carbón como MCS.....	9
3.3.2. Cenizas volantes procedentes de biomasa.....	12
3.3.3. Materiales alternativos a las cenizas volantes utilizados en el cemento	13
3.3.4. Materiales menos convencionales usados en el cemento para usos específicos	20
3.4. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO ₂ EN EL CEMENTO.....	21
3.4.1. Métodos de ahorro de energía y combustible.....	21
3.4.2. Procesos de separación, almacenamiento o reutilización del carbono	22
3.4.3. Uso de combustibles alternativos	24
4. SOFTWARE Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	30
5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	36
5.1. PROCESO PRODUCTIVO.....	36
5.2. TRANSPORTE.....	41
5.3. VIDA ÚTIL Y FIN DE CICLO DE VIDA	46
6. CONCLUSIONES.....	48
7. BIBLIOGRAFÍA.....	49

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el calentamiento global son una problemática que concierne tanto a las generaciones actuales como a las futuras. Causas como las altas emisiones de CO₂ por parte de algunas industrias, así como el excesivo número de residuos generados en el mundo están acrecentando estos problemas, haciendo cada vez más necesaria la búsqueda de soluciones con el fin de revertirlos.

El sector de la construcción, y más en específico del cemento, es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de CO₂ a la atmósfera. A pesar de su antigüedad, el cemento es el material más utilizado en el sector de la construcción. Aproximadamente entre el 5 y el 8% de las emisiones antropogénicas de CO₂ a nivel global son generadas durante el ciclo de vida de este material [1]. El origen de estas emisiones procede mayoritariamente, de su proceso productivo, donde debe destacarse especialmente la reacción de descarbonatación de los óxidos de calcio y de magnesio.

Debido a esto, es lógico que se busquen diferentes métodos y alternativas de reducir la huella de carbono del cemento, buscando a su vez el uso de una economía circular, que permita la conversión de los residuos en productos de utilidad. Existen asociaciones como Cembureau (Asociación Europea del Cemento) que han propuesto, utilizando distintos métodos y prácticas, estrategias de acción con el fin de alcanzar el objetivo de una reducción total de la huella de carbono para el año 2050.

El uso de materiales alternativos en el cemento se está convirtiendo en una de las prácticas más comunes y efectivas, que está logrando resultados positivos desde un punto de vista medioambiental [3].

Para demostrar los efectos de la sustitución en el cemento, este trabajo se enfocará en realizar un análisis comparativo de las emisiones generadas por el cemento ordinario y uno con una parte de su composición sustituida. También se mostrarán los efectos que estos materiales producen en las propiedades del hormigón. Por otra parte, se mostrarán otras alternativas utilizadas en la reducción de la huella de carbono, con el fin de llegar a unas conclusiones que permitan el futuro más sostenible posible.

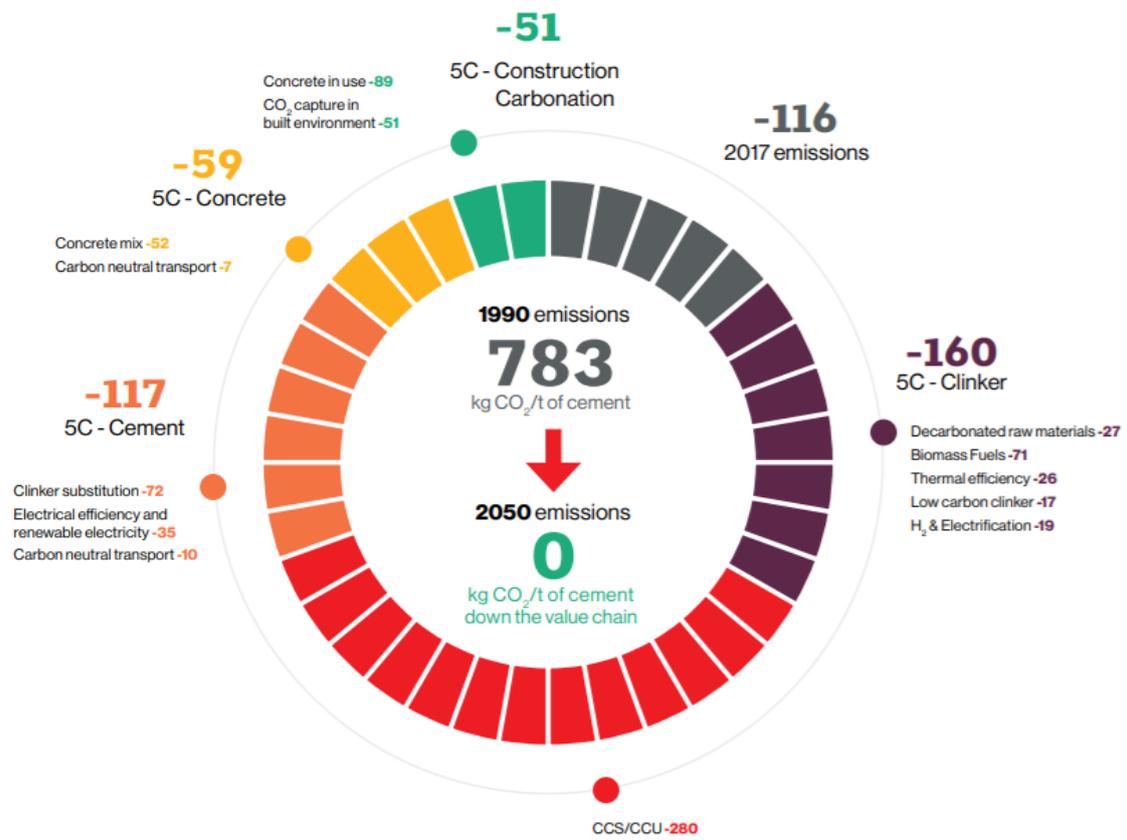


Figura 1. Plan de reducción de las emisiones de CO2 para el año 2050 [2].

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto será analizar y evaluar el impacto ambiental de materiales de construcción enfocándose principalmente en el cemento y sus distintas composiciones y adiciones, más en concreto, en las cenizas volantes.

El primer paso será la documentación y reunión de información para conocer los aspectos básicos, propiedades y características del cemento, así como su proceso productivo, y sus distintos tipos y composiciones. Además, se estudiará como estas composiciones afectan a las propiedades mecánicas y ambientales.

El siguiente paso del trabajo se centrará en realizar una evaluación del impacto de la huella de carbono. Para ello, nos ayudaremos de software de análisis de impacto ambiental y de datos bibliográficos. A partir de los resultados obtenidos, se estudiarán alternativas que reduzcan el impacto producido, ya sea buscando la composición óptima, mediante el uso de aditivos u optimizando el proceso productivo. Finalmente, se podrá obtener una visión más clara para poder aplicarla a una situación real.

Además, gracias al uso de distintas herramientas de gestión de materiales, se podrá estudiar la situación actual del cemento en lo respectivo a disponibilidad de inventarios y valores, con tal de buscar la mejor manera de recopilar estos datos.

Entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible elaborados por la ONU se identifican varias metas a las que se puede contribuir y que son de alta importancia [4]:

3.9 Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo.

7.a De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.

8.4 Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados.

9.4: De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.

12.4 De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.

12.5 De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

12.6 Alentar a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes.

12.a Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.

3. EL CEMENTO

El cemento es el material de construcción más usado en el mundo. Se trata de un conglomerante, que al mezclar con agua endurece, dando lugar a un producto resistente y estable.

El cemento más común es el Cemento Portland, cuya composición principalmente consta de óxidos de calcio (CaO), silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), hierro (Fe_2O_3) y magnesio (MgO), además de pequeñas cantidades de otros óxidos. Durante el proceso productivo, son estos óxidos los que se combinarán en el horno para producir las distintas fases del cemento, lo cual llevara consigo unas emisiones de dióxido de carbono.

3.1 La historia del cemento

Según algunas investigaciones, los primeros materiales cementantes aparecieron entre los años 7000 y 6000 a.C.

Los griegos y romanos durante aproximadamente el año 2000 a.C. empezaron a utilizar cal como aglomerante a partir de caliza calcinada, arcilla cocida y agua.



Ilustración 1. Pared romana elaborada con hormigón [5].

El avance más importante desde esa fecha es la puzolana, formada por sílice, y que al mezclar con cal y agua formaba un aglomerante hidráulico. Importantes edificaciones como el anfiteatro de Pompeya o el Coliseo de Roma estaban construidas en parte por este material.

Durante la edad media decayó el uso del hormigón, principalmente por la mala calidad de la cal. No fue hasta el siglo XVIII donde resurgió el uso del cemento, cuando el ingeniero John Smeaton aceptó reconstruir el faro de Eddystone, el cual necesitaba

poseer resistencia al oleaje, al viento y al fuego. Así fue como comenzó a utilizar diferentes mezclas hasta concluir en un cemento hidráulico.

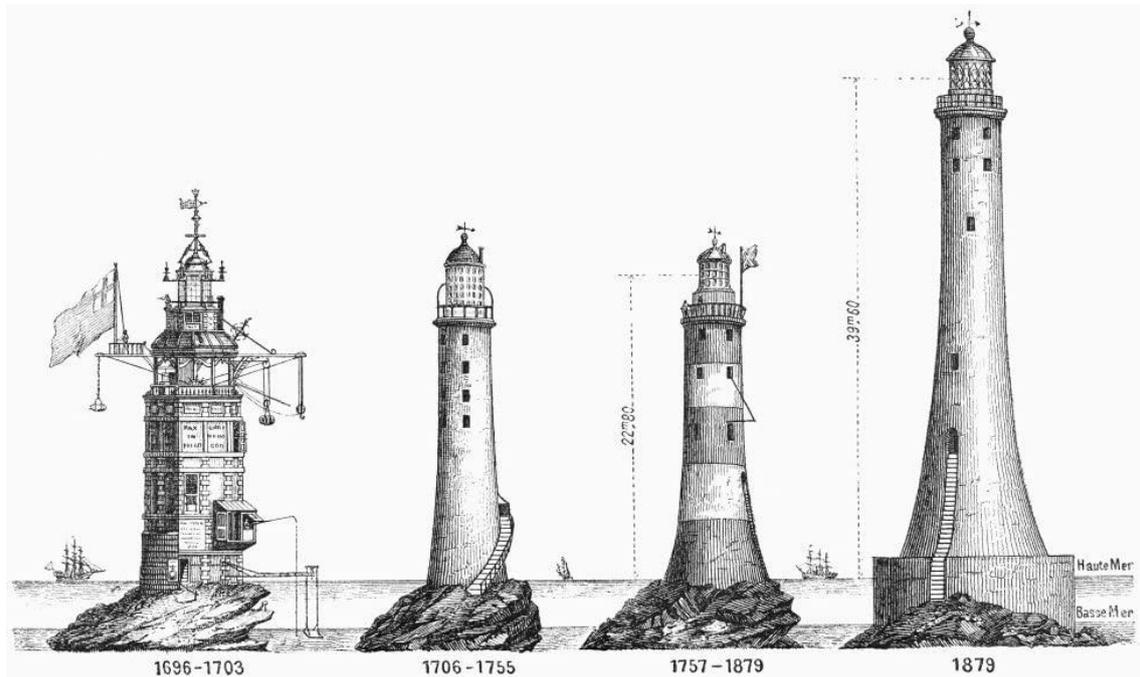


Ilustración 2. Reconstrucción del faro de Eddystone.

Durante los años siguientes, James Parker y Joseph Aspdin patentaron nuevos cementos artificiales, hasta que, en 1824, fue el mismo Joseph Aspdin el que calcinó en un horno una mezcla formada por tres partes de caliza y una de arcilla, dando lugar al primer cemento Portland.

En el año 1845, Isaac Johnson introdujo un conjunto de innovadores avances en el proceso productivo del cemento, basados en un aumento de la temperatura de la calcinación. Sin embargo, el uso del cemento no crecería significativamente hasta más adelante.

A partir del año 1900 se extiende el uso masivo del cemento en edificaciones y obras de ingeniería, debido a diferentes experimentos con los que se mejoraba la calidad del cemento, así como la introducción de los hornos rotatorios para la calcinación y el horno tubular para la molienda.

En la actualidad, el cemento es usado para una infinidad de aplicaciones. Los avances en sus distintas composiciones y variedades permiten una gran flexibilidad dependiendo de su uso [6],[7].

3.2. Producción de cemento

Se pueden identificar distintas etapas en el proceso productivo del cemento:

- **Producción del Clinker:** La mezcla de la composición, basada en caliza, arcilla, hierro y yeso, se trata en una unidad de piro-procesado. Al alcanzar los 550°C, comienza la descomposición de caliza y carbonato de magnesio en CaCO_3 , MgO y CO_2 . Posteriormente la mezcla entra en el calcinador para conseguir aumentar aún más la temperatura y finalmente se introduce en el horno, donde se desarrolla la parte más crucial del proceso. Entre los 900 y los 1200°C se forma C_2S (silicato bicálcico o belita, la cual proporciona resistencia a largo plazo) y entre los 1200 y 1280°C se forman C_3S (silicato tricálcico o alita, encargado de aportar la resistencia inicial y del rápido endurecimiento del cemento), C_3A (aluminato tricálcico o celita, que proporciona plasticidad y viabilidad), y C_4AF (ferritoaluminato tetracálcico, el cual reduce la temperatura de formación del Clinker y acelera el fraguado). Todos estos compuestos serán los componentes principales del Clinker. Cuando la mezcla alcanza los 1280°C, esta se funde. Finalmente, cuando se logran los 1450°C, se procede a enfriar la mezcla con aire a temperatura ambiente.

Todo este proceso consume aproximadamente un 90% del total de energía usada en el proceso completo de producción de cemento. Es por tanto que esta etapa es una de las que más debe tenerse en cuenta a la hora de buscar alternativas que mejoren el rendimiento del proceso productivo [8].

- **Producción del cemento a partir del Clinker:** Tras ser enfriado, el Clinker pasará a la unidad de triturado y mezcla. En ellas, las partículas grandes del Clinker se convierten en polvo y se les añaden aditivos.

Identificar, por tanto, las fuentes de las emisiones debe ser una labor importante para poder reducirlas. Podemos encontrar las siguientes:

1. Quema de combustibles fósiles en la unidad de piroprocesado.
2. Transporte de materias primas.
3. Descomposición de carbonato cálcico y carbonato de magnesio en CO_2 [8].
4. Molienda del Clinker para la producción de cemento [9].

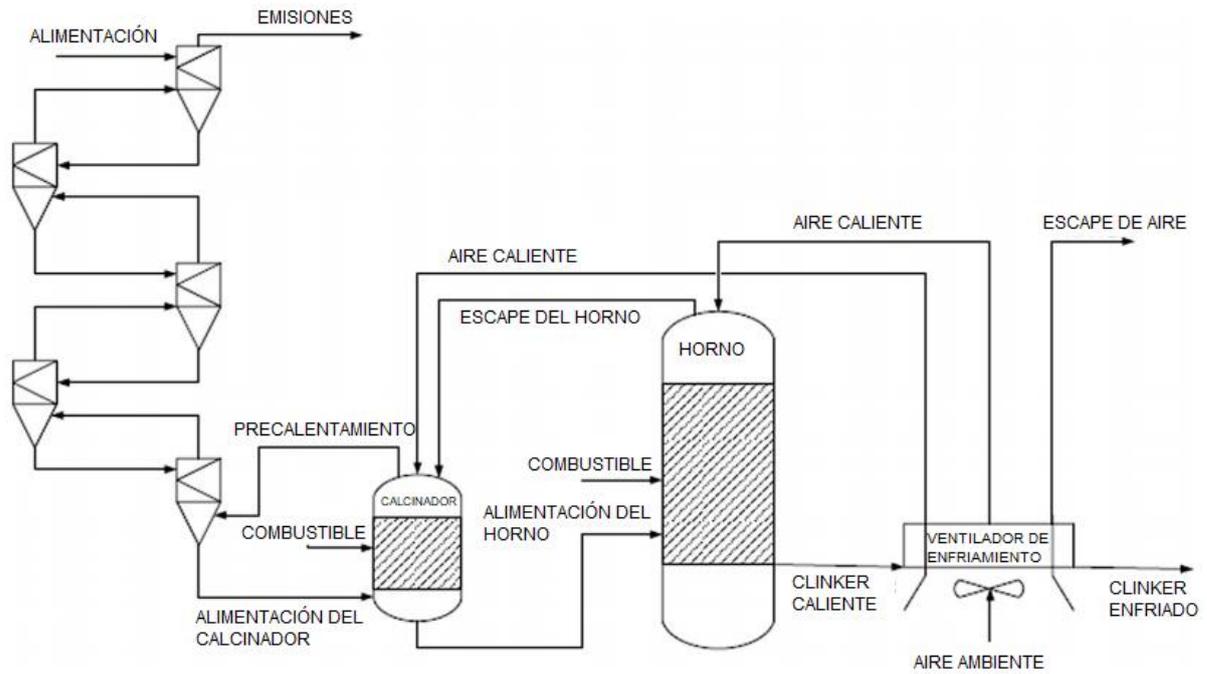
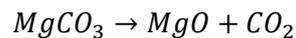
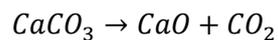


Ilustración 3. Esquema del proceso productivo del Clinker [8].

De las fuentes de emisiones mencionadas, se debe prestar especial atención en la reacción de los carbonatos de calcio y magnesio, debido a que es la que más contribuye a las emisiones. Se generan CO_2 siguiendo las siguientes reacciones:



A partir de los pesos moleculares se obtienen respectivamente unas de emisiones de CO_2 de 440 y 522g aproximadamente por kilo de carbonato a descomponer, lo cual se traduce en aproximadamente un 60% del total de las emisiones generadas en el proceso [10].

3.3 Cementos verdes

Generalmente, se considera un cemento verde como aquel que usa al menos un material de residuo o reciclado como uno de sus componentes, el cual debe seguir la filosofía de las 3R (reducir, reusar y reciclar), y que genera grandes beneficios al medioambiente. Los edificios y construcciones “verdes” son un paso más en la

búsqueda de una calidad de vida y una sostenibilidad ambiental adecuada en el futuro [11].

Debido a la gran cantidad de emisiones generadas en la producción del cemento Portland, se han estudiado distintas alternativas para que el proceso sea menos perjudicial medioambientalmente. Una de ellas, es el uso de los llamados Materiales cementantes suplementarios (MCS), los cuales darían lugar a una reacción puzolánica con el propio cemento, o adiciones alternativas (AA), las cuales formarían parte del cemento u hormigón sin producir una reacción con este. Estos suelen ser generalmente materiales de desecho de otros procesos, y se pueden clasificar según su fuente de procedencia: desechos agrícolas como ceniza de cáscara de arroz o ceniza de serrín; desechos industriales como las cenizas volantes o humo de sílice y residuos urbanos como cristales, plásticos y papel.

Además de una reducción en la huella de carbono, se ha demostrado una mejora en algunas propiedades de los cementos verdes en comparación a los convencionales.

Por otro lado, las principales desventajas o problemas del uso de materiales alternativos son la limitada disponibilidad de estos materiales en algunos lugares, la alteración de las propiedades con resultados negativos para el cemento, los cambios en el método del proceso y la aceptación económica del mercado [12].

3.3.1 El uso de cenizas volantes procedentes del carbón como MCS

Las cenizas volantes son el residuo generado durante la quema de carbón en centrales térmicas. Se elimina mediante colectores mecánicos o precipitadores electrostáticos, como partículas finas de los gases de combustión. Su composición principalmente consta de SiO_2 (40-58%), Al_2O_3 (21-27%), Fe_2O_3 (4-17%) y CaO (4-6%). La variación en estos valores se debe al tipo de carbón usado en distintos países. Además de su uso como MCS, también son utilizadas en materiales refractarios, ladrillos y asfaltos [13].

La ceniza volante tiene una estructura amorfa de aluminosilicatos con cantidades variables de calcio, que al mezclarse con el cemento Portland reaccionan con la portlandita, Ca(OH)_2 para producir silicato cálcico hidratado e hidratos de aluminato de calcio.

El desempeño de las cenizas volantes depende en gran medida de sus propiedades. Respecto a las propiedades mineralógicas y químicas, estas dependen de la

composición del carbón del que provienen, así como las condiciones de la quema en el proceso de la quema del carbón.

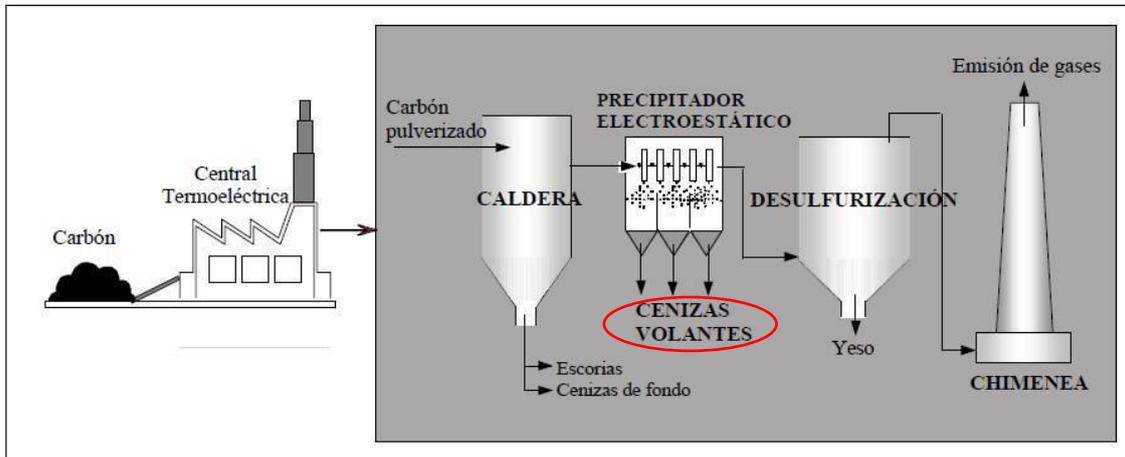


Ilustración 4. Esquema del proceso de obtención de cenizas volantes a partir de carbón [14].

Se pueden diferenciar dos tipos de cenizas volantes:

- Clase C: Se producen quemando lignito o carbón sub bituminoso en combinación con SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 en una proporción del 50% a 70%.
- Clase F: Se producen al quemar antracita o carbón bituminoso en combinación con SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 al 70% [16].

Las principales barreras a su utilización son problemas técnicos relacionados con las especificaciones y producción de las cenizas volantes. Además, existen otros impedimentos económicos como el alto coste del transporte de estas y barreras legales relacionados con la falta de información ambiental referida al uso de este material [17].



Ilustración 5. Comparación visual del cemento Portland y las cenizas volantes [15].

3.3.1.1 Modificación de las propiedades del cemento

El uso de cenizas volantes como MCS del cemento trae consigo un cambio de las propiedades del cemento, que se pueden clasificar según el tipo de propiedad.

Propiedades del cemento fresco:

- Viabilidad: El uso de cenizas volantes reduce la demanda de agua del cemento, por tanto, se permite que se produzca hormigón requiriendo menos agua que con solo cemento Portland.
- Exudación: Este fenómeno ocurre cuando el agua de la mezcla se eleva a la superficie durante el fraguado del cemento. Debido a la disminución de agua requerida, la exudación se ve reducida. Con altos niveles de cemento puede incluso llegar a eliminarse por completo.
- Arrastre de aire: Se trata de la entrada de burbujas de aire en el cemento, lo que se traduce en una mejora de las propiedades. Para los cementos con cenizas de clase F se requieren mayores cantidades de aditivos incorporadores de aire para alcanzar unas buenas propiedades, debido a la presencia de carbón no quemado que absorbe los aditivos. Al aumentar el calcio de las cenizas se requiere menor cantidad de estos aditivos.
- Tiempo de fraguado del hormigón: En general, se produce un retardo del fraguado, que se acentúa con temperaturas bajas y con el uso de cenizas volantes con bajas cantidades en calcio. Este valor también aumenta para cementos con altos valores de sustitución.
- Calor de hidratación: El uso de cenizas volantes provoca una reducción en el calor producido y una reducción de la temperatura interna del hormigón.

Respecto a las propiedades del cemento endurecido:

- Fuerza compresiva: Para etapas tempranas, a mayor nivel de cenizas volantes disminuye la resistencia a compresión. A largo plazo, el uso de cenizas volantes produce un aumento en la resistencia a compresión [18], [19].
- Creep o fluencia: En etapas tempranas hay mayor fluencia en los hormigones con cenizas volantes debido a que tienen una menor fuerza compresiva. Con el paso del tiempo, se observa una disminución en la fluencia debido a la ganancia de fuerza.
- Contracción por secado: Para hormigones con una adecuada proporción de cenizas volantes, la reducción en la necesidad de agua puede llegar a provocar una disminución en la contracción por secado, o al menos no aumentarla [20].

Las mejoras en las propiedades de durabilidad y resistencia son las siguientes:

- Resistencia a la abrasión: La presencia de cenizas volantes se traduce en un aumento de la resistencia a la abrasión [16].
- Permeabilidad y resistencia a la penetración de cloruros: Las cenizas volantes reducen la permeabilidad a gases y agua. Por otra parte, la permeabilidad a cloruros debe tenerse en cuenta principalmente en ambientes marinos, donde los iones cloruros presentes en el agua pueden producir un deterioro del hormigón. Distintos estudios señalan un aumento en el RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) del cemento con presencia de cenizas volantes [21], [22].
- Reacción álcali-sílice: Esta se da lugar cuando la disolución alcalina (óxidos de sodio y potasio) de los poros del hormigón reacciona con compuestos silíceos, dando lugar a un gel que produce una expansión de este [16].

La presencia de cenizas con bajo contenido en calcio son capaces de controlar estas reacciones cuando su tasa de sustitución es entre el 20 y el 30%. Por otra parte, los cementos de alto contenido en calcio son menos eficaces en esta función [16].

- Resistencia a sulfatos: Propiedad de alto interés cuando se trabaja en contacto con aguas con altas cantidades de sulfatos. Varios estudios señalan un aumento en la resistencia a sulfatos en hormigones con cenizas de tipo F. Por otra parte, también se ha concluido en que los hormigones con cenizas tipo C son ineficaces para evitar estas reacciones [16].
- Carbonatación: Proceso en el cual el hidróxido cálcico presente en el cemento reacciona con ácido carbónico presente en el agua debido a una previa reacción de esta agua con CO_2 del aire. Supone un peligro debido a que se pierde la resistencia a la corrosión. En hormigones con cenizas volantes debe prestarse especial atención en ambientes proclives a la carbonatación, procurando que el curado del hormigón y su composición sean las adecuadas [16].
- Resistencia a la congelación y descongelación cíclicas: Un hormigón con altas cantidades de cenizas volantes puede conseguir una buena resistencia a congelaciones y descongelaciones cíclicas en presencia de sales descongelantes, pero algo inferiores a las del hormigón con únicamente Cemento Portland [16], [23].

3.3.2 Cenizas volantes procedentes de biomasa.

Con el paso de los años, el número y la producción de las plantas de producción de carbón disminuye. Por otra parte, la creciente cantidad de vertederos de biomasa está provocando un aumento del volumen de la deposición de estos residuos, así como un

aumento en los costes de su deposición, lo cual se ha convertido en un problema a nivel global. Debido a ello surge una vía alternativa para la obtención de cenizas volantes que además muestra altos beneficios frente al medio ambiente.

Las cenizas procedentes de biomasa proceden principalmente de plantas y centrales térmicas, las cuales generalmente son depositadas sin control en vertederos. Un uso de esta biomasa en el cemento permite una reducción de los gases de efecto invernadero, consiguen disminuir el uso de materias primas en la producción de cemento, y además evitan la acumulación de biomasa en vertederos, dándoles así un uso a estas e introduciéndolas de nuevo en un sistema productivo. El principal inconveniente que se interpone a su uso es que pueden provocar emisiones de sustancias peligrosas o tóxicas a la atmósfera al ser utilizadas como sustitutivo del cemento [24], [25].

Las principales diferencias frente a las cenizas procedentes de la combustión de carbón son sus características, la tecnología de combustión empleada, y especialmente su localización y disponibilidad. Esta última diferencia puede ser determinante, ya que además de los beneficios ya presentados, puede suponer una disminución de las emisiones de CO₂ generadas en el transporte de las cenizas a planta, y así suponer un impacto realmente eficaz en la huella de carbono [26].

La modificación en las propiedades que deriva del uso de cenizas procedentes de biomasa depende principalmente del tipo y propiedades de la biomasa, pero se ha revelado que son capaces de obtener las mismas propiedades mecánicas que los logrados para la sustitución con cenizas volantes de carbón para porcentajes de sustitución en torno a un 25% [27].

3.3.3 Materiales alternativos a la ceniza volante utilizados en cementos

Las cenizas volantes no son el único compuesto que puede emplearse como MCS. Existen una amplia variedad de materiales que pueden usarse con este fin. Entre los más destacados se encuentran:

1. Ceniza de cáscara de arroz.

La ceniza de cáscara de arroz es un residuo que se puede emplear como sustitutivo en el cemento. Se trata de un residuo agrícola que se produce al quemar cáscara de arroz en campo abierto o bajo condiciones de incineración, controlando la temperatura y la duración de esa incineración. Aproximadamente el 75-90% de la composición de cáscara de arroz es materia orgánica como celulosa (50%), lignina (25-30%) y sílice (15-

20%). Al quemarla, la ceniza tiene altos contenidos en sílice. A partir de 100 kg de cáscara de arroz se pueden obtener alrededor de 20kg de cenizas [28].



Ilustración 6. Cáscara de arroz, ceniza de cáscara de arroz, y ceniza de cáscara de arroz molida [28].

Sus diferencias respecto al cemento Portland son la reducción en el coste, su facilidad de obtención y la reducción en las emisiones de CO₂.

Los cambios en las propiedades en fresco son: necesidad de una mayor cantidad de agua para alcanzar un cemento con una viabilidad adecuada, lo que supone una disminución en esta con el aumento del porcentaje de sustitución. Respecto al tiempo de fraguado, este no se ve afectado.

Las propiedades del cemento endurecido son una disminución de la densidad, y resultados óptimos para fuerza de compresión en sustituciones entre el 5 y el 15%. La siguiente figura muestra los resultados para distintos porcentajes de sustitución y distintas edades del cemento:

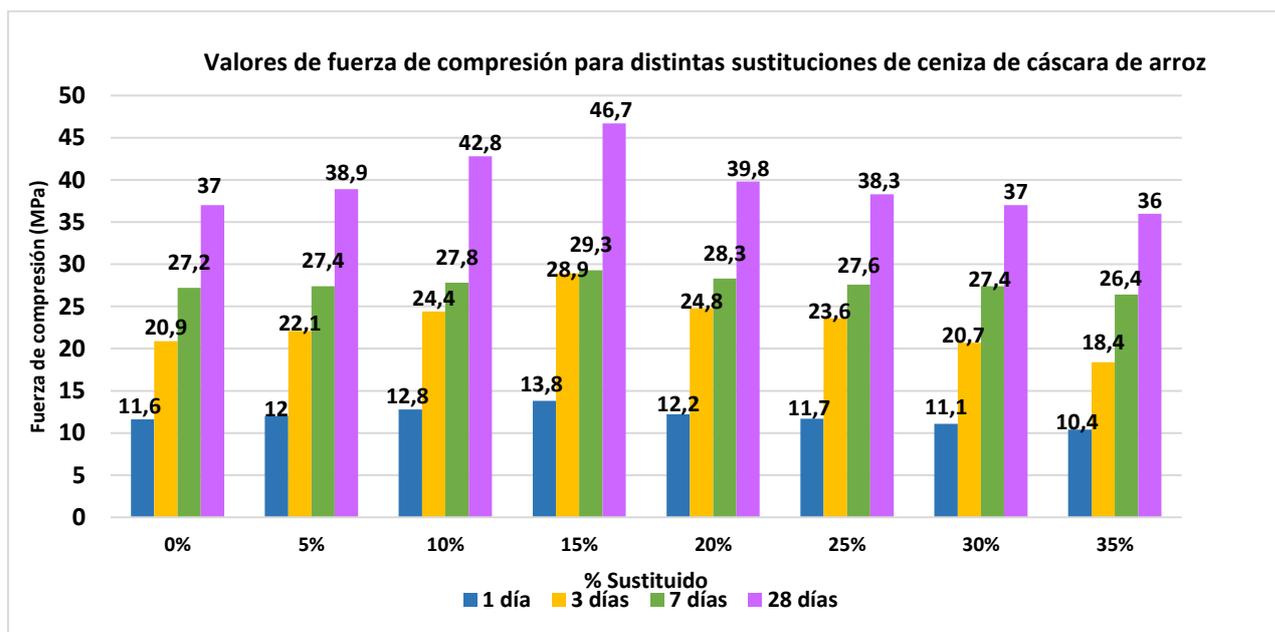


Figura 2. Fuerza de compresión de cementos con sustituciones de cáscara de arroz [28].

En cuanto a la durabilidad, se consiguen en general mejores resultados que con cemento Portland, disminuyendo la absorción de agua y aumentando la resistencia a ataques químicos, como sulfatos. Además aumentar el porcentaje de sustitución de cenizas de arroz logra una disminución en la penetración de cloruros [29], [30].

2. Humo de sílice.

Se trata de un subproducto de color grisáceo, obtenido en la producción de silicio y ferrosilicio. La reducción de cuarzo de alta pureza a silicio a temperaturas de hasta 2000°C genera vapores de SiO_2 , que se condensan en partículas de sílice no cristalina [31].



Ilustración 7. Polvo de humo de sílice [32].

La mejora en las propiedades supone un aumento de la viabilidad en torno a una sustitución del 10%, disminuyendo la demanda de agua. También se logran tiempos de fraguado menores.

La fuerza de compresión se hace óptima en niveles de sustitución de un 15%, disminuyendo para valores mayores de sustitución.

Respecto a la durabilidad se ha logrado demostrar que se produce un aumento en la resistencia a sulfatos. Por otra parte, la permeabilidad y porosidad disminuyen lo que supone una mejora en la resistencia a la carbonatación. Además se consigue una mejor resistencia al ataque de cloruros [33].

3. Escoria de alto horno

Se trata de un subproducto de la fabricación de acero en un alto horno. En él se calientan mineral de hierro, caliza y coque hasta unos 1500°C, que al fundir dan lugar al hierro

fundido y a la escoria fundida. Al enfriar la escoria con agua a alta presión se forman partículas granulares de aluminosilicatos de calcio no cristalinos. Al secar y moler la escoria se obtiene la escoria de alto horno, un polvo fino [34].



Ilustración 8. Comparación visual de polvo de alto horno y de cemento.

El uso de la escoria de alto horno provoca una disminución de la fuerza de compresión en etapas tempranas del cemento. A partir de 28 días aproximadamente se han conseguido valores iguales o superiores que con cemento Portland para sustituciones de hasta el 60% de escoria [35]. Las figuras 3,4 y 5 muestran la diferencia de estos valores de fuerza de compresión para distintos grados de sustitución (Cemento Portland-escoria de alto horno):

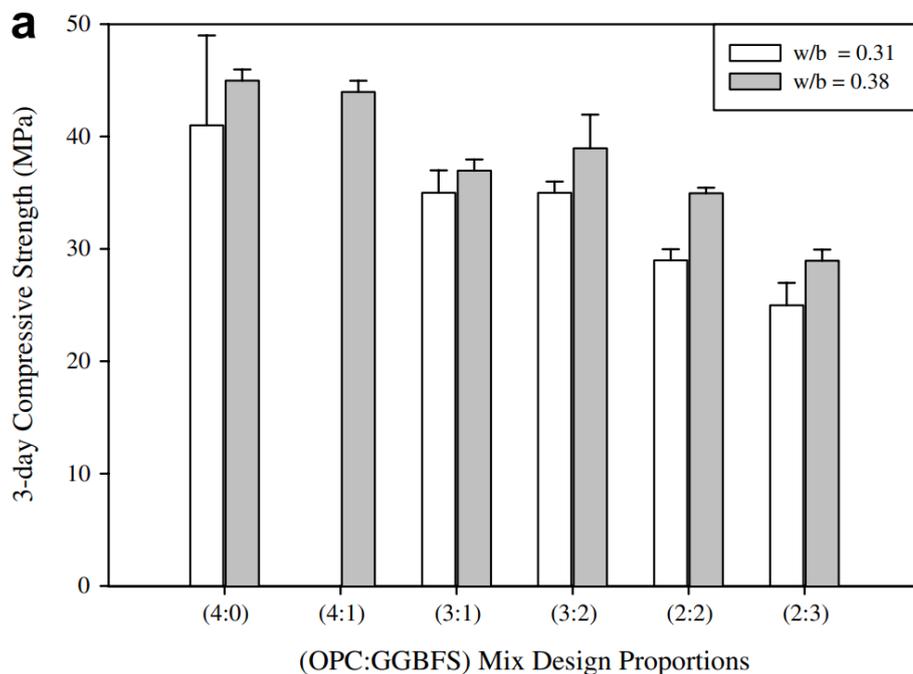


Figura 3. Valores de fuerza de compresión a los 3 días para distintas proporciones de sustitución [35].

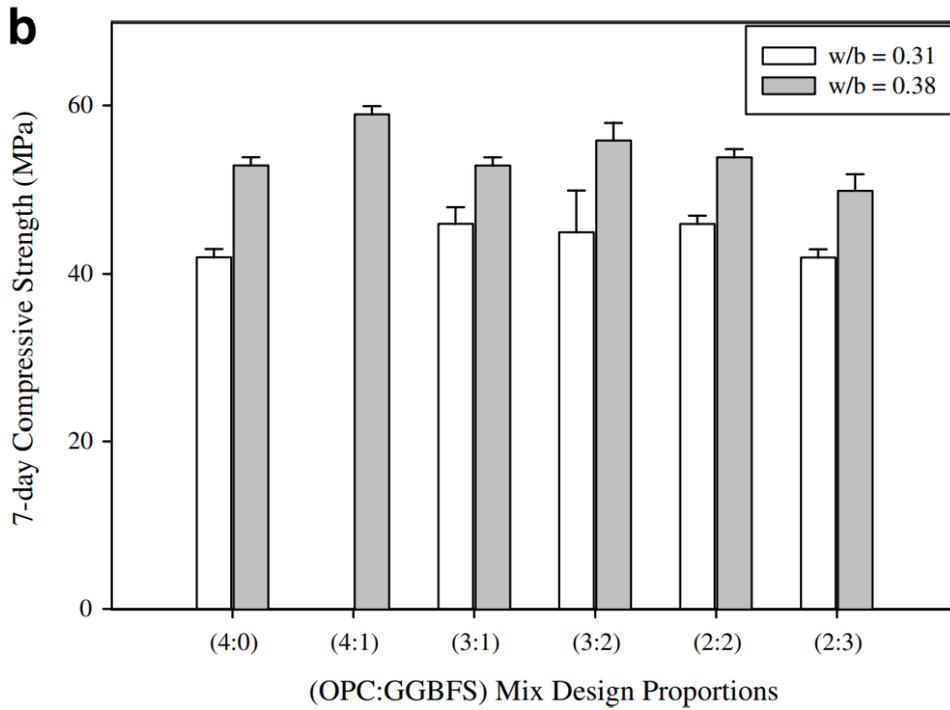


Figura 4. Valores de fuerza de compresión a los 7 días para distintas proporciones de sustitución [35].

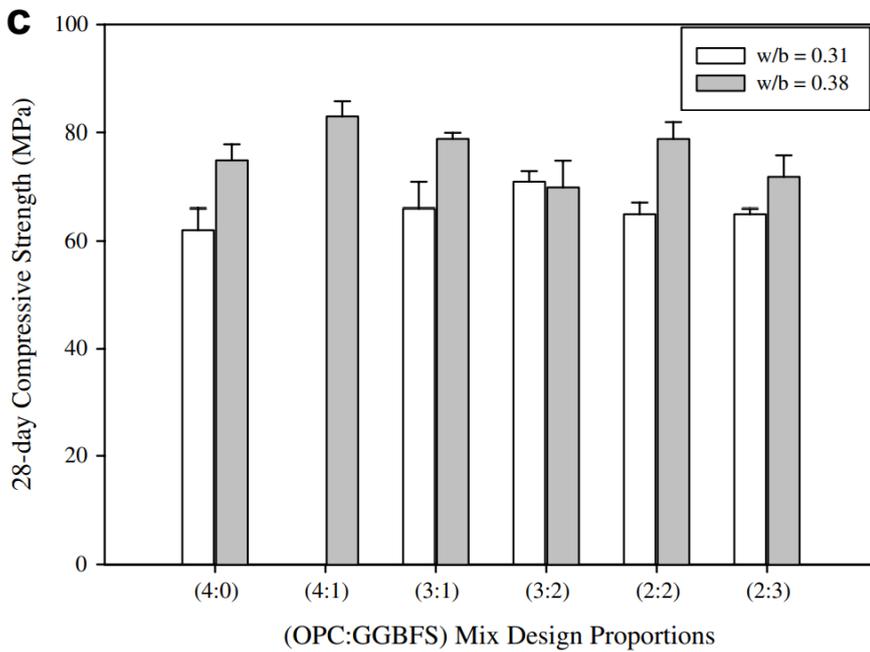


Figura 5. Valores de fuerza de compresión a los 28 días para distintas proporciones de sustitución [35].

En cuanto a la durabilidad, la sustitución de cemento por escoria de alto horno mejora la resistencia a sulfatos, ácidos y cloruros [36].

4. Residuos del vidrio

El vidrio se produce al enfriar una mezcla de arena y carbonato de sodio. La industria del vidrio tiene altos porcentajes de reciclaje, ya que este mantiene sus propiedades al ser reciclado. En este caso el vidrio no produciría una reacción puzolánica con el cemento, por lo que no se trataría de un sustitutivo sino de una adición a este. El más utilizado en el cemento es el vidrio común, o vidrio de sílice, arena y sosa. Su composición es de alrededor de 73% de SiO_2 , 13% de Na_2O y 10% de CaO .



Ilustración 9. Adición de residuos de vidrio al hormigón [37].

La adición de residuos de vidrio al hormigón produce silicato tricálcico y reduce la proporción de silicato dicálcico y aluminato tricálcico, proporcionando al hormigón mayor resistencia a ataques de sulfatos.

Además, la inclusión de vidrio en cementos altera algunas de sus propiedades. Este proporciona una mayor viabilidad, debido a una disminución en la absorción de agua y a la presencia de partículas más gruesas en el material.

Hay varios estudios que muestran un aumento de la fuerza de compresión en cementos con presencia de polvo de vidrio, pero valores superiores al 10% pueden llegar a disminuirla, lo cual se puede deber a la dificultad de adhesión del vidrio al cemento. En la siguiente figura se muestran resultados de fuerzas de compresión obtenidos según distintas fuentes, dependiendo del porcentaje utilizado en el cemento:

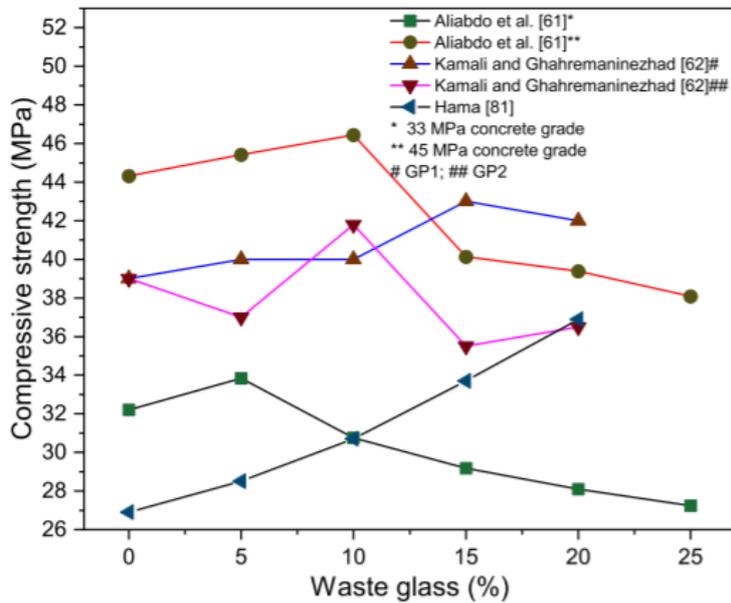


Figura 6. Fuerza de compresión de cementos con residuos de vidrio según distintas fuentes [38].

Respecto a las propiedades de durabilidad, se consigue una baja permeabilidad, además de mayor resistencia a la carbonatación para etapas tardías, y unos resultados algo peores en cuanto a resistencia a los cloruros [39],[38].

5. Metacaolín

El metacaolín ($Al_2Si_2O_7$) es un material obtenido a partir de la calcinación de caolinita en un rango de temperaturas de entre 500 y 800°C. Su prefijo meta se debe al cambio que produce la deshidroxilación, que hace que la caolinita pierda agua. El objetivo para su uso como MCS es conseguir este proceso sin necesidad de un calentamiento excesivo de la caolinita, con el fin de obtener una estructura desordenada, amorfa, que es en gran parte puzolánica.



Ilustración 10. Metacaolín.

Sus principales ventajas como MCS son un aumento de la fuerza compresiva, una contracción reducida y mayor viabilidad y acabado del hormigón.

Además, mejora varias propiedades respectivas a durabilidad, como son una superior resistencia a ataques químicos y a la reacción álcali-sílice, así como una reducción de la permeabilidad [40].

3.3.4 Materiales menos convencionales usados en el cemento para usos específicos.

Además de los materiales mencionados anteriormente, los cuales se tratan de los más comunes, existen otros enfocados a funciones más específicas o cuyo uso no está tan extendido.

1. Residuos de neumáticos.

La peligrosidad de la acumulación de residuos neumáticos supone un peligro medioambiental, además de los riesgos de incendio. Debido a ello existen usos alternativos de estos residuos, como el “rubcrete”, que consiste en el uso de gomas de neumático reciclado en mezclas con Cemento Portland. Su uso puede ser beneficioso en estructuras en zonas con riesgos de vibraciones, como por ejemplo en ciudades con grandes incidencias de terremotos.

2. Ceniza de madera.

La ceniza de madera es el residuo que se produce en la quema de la madera y sus productos. Lo que determina sus propiedades es el tipo de madera, así como el método usado en la combustión.

Su uso en el cemento está limitado a hormigones de baja o media resistencia, debido a su alto contenido en carbono.

3. Residuos de plástico y plásticos reciclados

Cada año, el uso mundial de plásticos crece, debido a su gran variedad de usos y alternativas. Debido a ello, también cada año aumenta la cantidad de residuos plásticos que se generan en el planeta.

El uso de estos residuos en cementos se enfoca principalmente en la reparación de superficies de hormigón deterioradas o dañadas puede lograr disminuciones de energía y de emisiones de CO₂, NO y SO₂.

4. Cenizas volcánicas

Las cenizas volcánicas forman parte de las puzolanas naturales. Se forman a partir de las erupciones de volcanes, cuando las rocas sólidas se rompen, y al fundirse en magma, este se separa en pequeñas partículas, dando lugar a las cenizas. Están formadas principalmente por vidrio volcánico, minerales y otras rocas.

En el escenario del cemento, a pesar de su bajo uso por su escasez, estas se usan como aditivos ligeros de este. Además, debido a poseer propiedades cementantes, se puede llegar a usar como sustitutivo del cemento en ciertas cantidades.

5. Arena de fundición.

Se trata de un subproducto de la fundición de metales ferrosos y no ferrosos, en los que la arena se utiliza como material de moldeo debido a su conductividad térmica. Las propiedades de esta arena dependen del sector de la industrial del cual provienen, así como del tipo de proceso de fundición.

Se usa en el Cemento Portland como sustitutivo de aditivos finos, en los que se han conseguido valores similares para la fuerza de compresión y el módulo de elasticidad.

Una de sus desventajas de su uso es el color negro de esta arena, el cual a veces proporciona un acabado del hormigón no deseable [40].

3.4. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂

Como se ha podido analizar en el apartado dedicado a la producción, la mayoría de las emisiones de CO₂ son generadas en el proceso productivo. Es por ello, que además del uso de materiales alternativos al Cemento Portland, se plantea la utilización de una serie de distintas técnicas para conseguir una reducción de la huella de carbono.

3.4.1 MÉTODOS DE AHORRO DE ENERGÍA Y COMBUSTIBLE EMPLEADOS

Las estrategias más utilizadas son:

- Uso de procesos más eficientes energéticamente: Entre los que destacan prácticas como cambiar el proceso en seco, caracterizado por un secado previo al horno, por un proceso en mojado, donde la mezcla de materias primas se introduce directamente sin secar. Este cambio puede llegar a ahorrar un 50% de la energía requerida y una reducción de CO₂ de alrededor del 20%.

- Reducción de pérdidas por calor en la unidad de piroprocesado: Debido a la alta energía consumida en esta unidad (alrededor del 90% del total), es conveniente reducir las pérdidas de energía. Para ello suelen utilizarse carcasas secundarias y aislamientos para evitar pérdidas de la superficie de los equipos, y distintos métodos de sellado para evitar fugas de aire. El uso de estas prácticas puede llegar a suponer hasta un 8% de la huella de carbono total.
- Recuperación de energía de vapores de escape: Los vapores generados en el horno pueden utilizarse como una fuente de energía, por ejemplo, en el precalentamiento de las materias primas, de modo que así reintroducimos estos vapores en el proceso.
- Otros métodos de optimización de planta: Enfocados a la reducción de pérdidas por calor y de energía eléctrica. Se utilizan distintas técnicas y equipos como los motores de alta eficiencia, para disminuir los gastos en electricidad, el uso de quemadores para hornos, para reducir el uso de combustibles y mantenimientos regulares y exhaustivos, así como monitorización y controles de los equipos.

Las principales desventajas de estas prácticas son el requerimiento de nuevos equipos, lo que supone costes adicionales para la planta [8].

3.4.2 PROCESOS DE SEPARACIÓN, ALMACENAMIENTO O REUTILIZACIÓN DE CARBONO

El método de captura y almacenamiento del carbono (CAC) puede ser utilizado en el proceso productivo del cemento. El objetivo es capturar el CO₂ generado en forma de emisión para almacenarlo en un lugar fuera de peligro para la atmósfera, como el subsuelo o el fondo del mar.

Los pasos utilizados para realizar este procedimiento son los siguientes:

- Captura del CO₂: Son empleadas distintas técnicas y tecnologías dependiendo del método empleado. Se distinguen tres distintos tipos de tecnología de captura:
 1. Captura precombustión: El combustible reacciona con oxígeno y vapor para producir una mezcla de CO₂ y H₂. Estos serán separados para almacenar el primero y usar el segundo como combustible.
 2. Captura postcombustión: El CO₂ es separado del gas de combustión. No altera el proceso productivo. Se trata de la técnica más cara de captura, en torno a unos 107€/ton de dióxido de carbono capturado.

3. Captura de oxidación: El combustible empleado es quemado con oxígeno en vez de aire natural, generando un gas mayoritariamente compuesto de CO₂. Es la técnica de captura más barata, costando en torno a unos 40€/ton de CO₂ capturada. Sin embargo, es la que más problemas de nivel técnico genera.
- Transporte del CO₂: El método más efectivo, seguro y económico es mediante sistemas de tuberías, similares a los del gas natural.
 - Almacenamiento del CO₂: Dependiendo de la zona geográfica se pueden emplear distintos lugares de almacenamiento, como depósitos de petróleo y gas, vetas de carbón, formaciones salinas.
 -

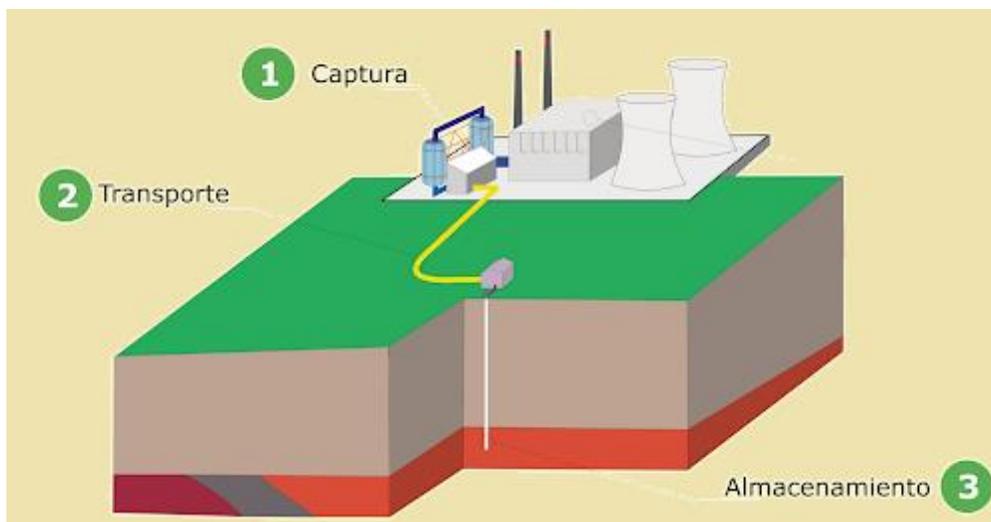


Ilustración 11. Imagen esquemática del proceso de captura y almacenamiento de CO₂ [41].

Los principales inconvenientes de la aplicación de esta técnica son es el elevado precio de la tecnología empleada, (siendo la más barata la de oxidación), y problemas técnicos como una excesiva cantidad de gas de combustión, las impurezas presentes en la mezcla y los altos requerimientos energéticos [42].

Por otro lado, en los últimos años se están desarrollando prácticas de reutilización del CO₂, de modo que este no tenga que ser almacenado. Es el proceso que se conoce como captura y uso del carbono (CUC). La gran variedad de sectores que se pueden beneficiar de su uso son algunos como los de la industria química, la energética, la alimentaria o la farmacéutica, así como también la propia industria del cemento [43].

Se estima que el uso de estas tecnologías podría llegar a lograr reducciones de emisiones de CO₂ de hasta un 25% para el año 2050, siendo la segunda tecnología más

eficaz en el objetivo de la eliminación de la huella de carbono en la industria del cemento, solo superada por los materiales sustitutos [44].

3.4.3 USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

El uso de combustibles alternativos en lugar de combustibles fósiles convencionales incluye el uso de biomasa, residuos químicos, derivados del petróleo y otros. Pueden suponer una disminución en la huella de carbono, así como un descenso del coste del proceso. Destacan:

- Residuos agrícolas: Como cáscara de arroz, de avellana, de coco, mazorcas de café. El aumento o reducción de CO₂ que se consigue utilizando estos residuos como combustibles es el que aparece en la tabla 1:

Combustible	ΔCO_2 (ton/ton de combustible sustituido)
Cáscara de arroz	-2.5
Paja de trigo	-2.5
Rastrojo de maíz	-2.5
Hojas de caña de azúcar	-2.5
Bagazo de la caña de azúcar	-2.5
Tallos de colza	-2.5
Cáscaras de avellanas	-2.5
Cáscara de nuez de palma	-2.5

Tabla 1. Valores de variación de emisiones de CO₂ con el uso de combustibles agrícolas frente a combustibles fósiles [45].

Se puede lograr una sustitución de alrededor del 20% de los combustibles fósiles convencionales. La figura 7 muestra la cantidad de combustible alternativo necesaria para reemplazar una tonelada de combustible fósil. Además, el uso de combustibles de biomasa procedente de residuos agrícolas reduce también las emisiones de óxidos de nitrógeno. Otro factor importante a tener en cuenta es el coste y las emisiones generadas en el transporte de esta biomasa a la planta de producción. En caso de que esta suponga un problema, el uso de esta podría ser más conveniente en otros ámbitos como el enriquecimiento del suelo.

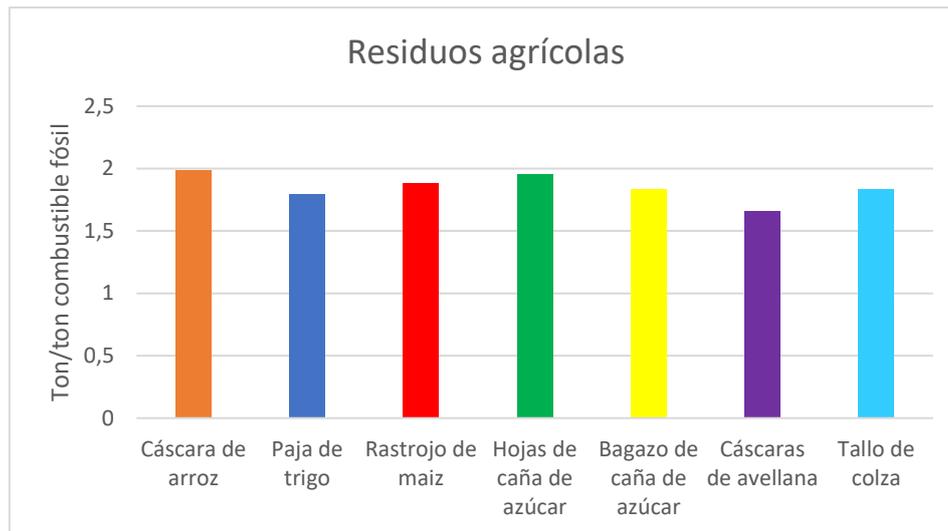


Figura 7. Relación entre la cantidad de combustible de residuos agrícolas necesario para sustituir una tonelada de combustible fósil [45].

- Biomasa de residuos no agrícolas: Incluyen residuos de animales y otros tales como papeles. La tabla 2 muestra los valores de aumento o disminución de CO₂ respecto a combustibles fósiles.

Combustible	ΔCO_2 (ton/ton de combustible sustituido)
Lodos de depuradora deshidratados	-2.5
Lodos de depuradora secos	-2.5
Lodo de papel	-2.5
Papel	-2.5
Serrín	-2.5
Madera de desechos	-2.5
Desechos de animales	-2.5

Tabla 2. Valores de variación de emisiones de CO₂ con el uso de combustibles no agrícolas respecto a combustibles fósiles [45].

Los residuos no agrícolas pueden conseguir una tasa de sustitución del 30% de los combustibles fósiles. La figura 8 muestra la cantidad de combustible alternativo necesaria para reemplazar una tonelada de combustible fósil.

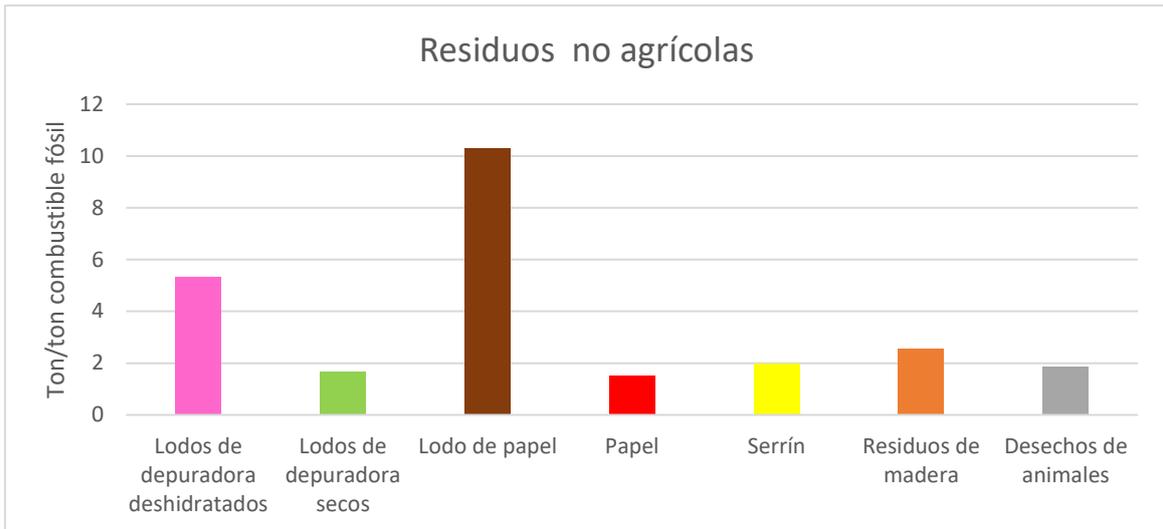


Figura 8. Relación entre la cantidad de combustible de residuos no agrícolas necesario para sustituir una tonelada de combustible fósil [45].

- Residuos químicos peligrosos: Procedentes de residuos de pinturas, pesticidas, disolventes, baterías, residuos radioactivos. Pueden suponer la sustitución del 12% del combustible utilizado en los hornos. Las diferencias respecto al CO₂ emitido con combustibles fósiles son las que se muestran en la tabla 3:

Combustible	ΔCO_2 (ton/ton de combustible sustituido)
Disolvente usado	-0.89
Residuos de pintura	0.21

Tabla 3. Valores de aumento y disminución de CO₂ para combustibles procedentes de residuos químicos peligrosos respecto a combustibles fósiles [45].

La cantidad de combustible necesario para sustituir una tonelada de combustibles fósiles es la que aparece en la figura 9:

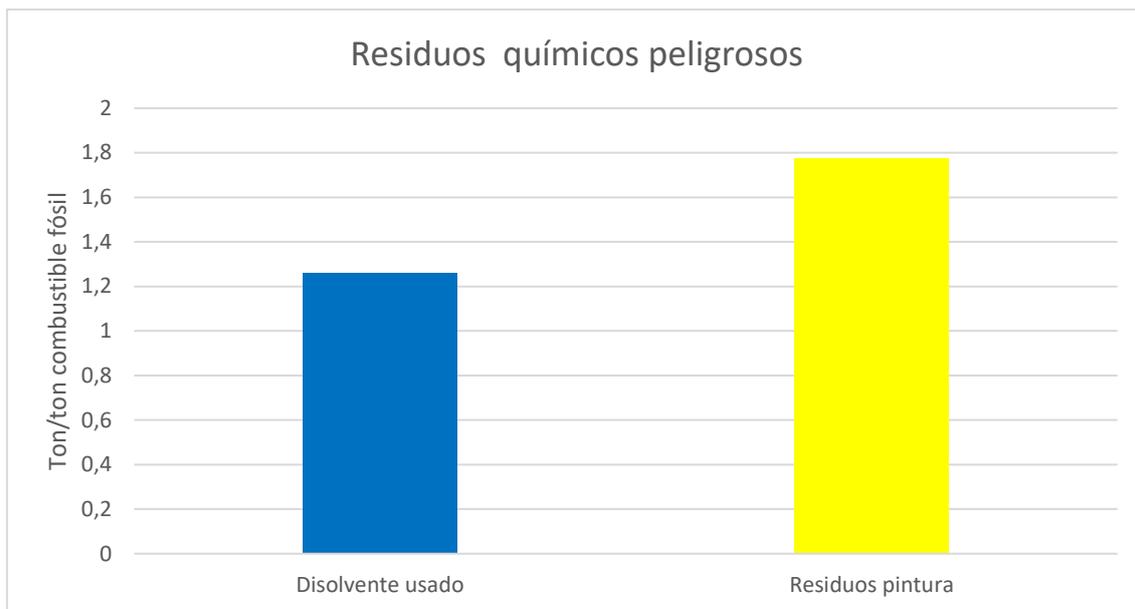


Figura 9. Relación entre la cantidad de combustible de residuos químicos peligrosos necesario para sustituir una tonelada de combustible fósil [45].

- Residuos derivados del petróleo: Como neumáticos, gomas, plásticos, asfalto. Pueden conseguir una tasa de sustitución del 20% de los combustibles fósiles. Los valores de aumento y disminución de las emisiones de CO₂ aparecen en la tabla 4.

Combustible	ΔCO_2 (ton/ton de combustible sustituido)
Neumáticos	-0.83
Polietileno	-1.03
Polipropileno	-1.03
Poliestireno	-0.85
Aceite usado	-0.53
Coque de petróleo	0.21

Tabla 4. Valores de aumento y disminución de CO₂ para combustibles procedentes de residuos derivados del petróleo respecto a combustibles fósiles [45].

Las toneladas de derivados del petróleo requeridas para reemplazar una tonelada de carbón son los siguientes:

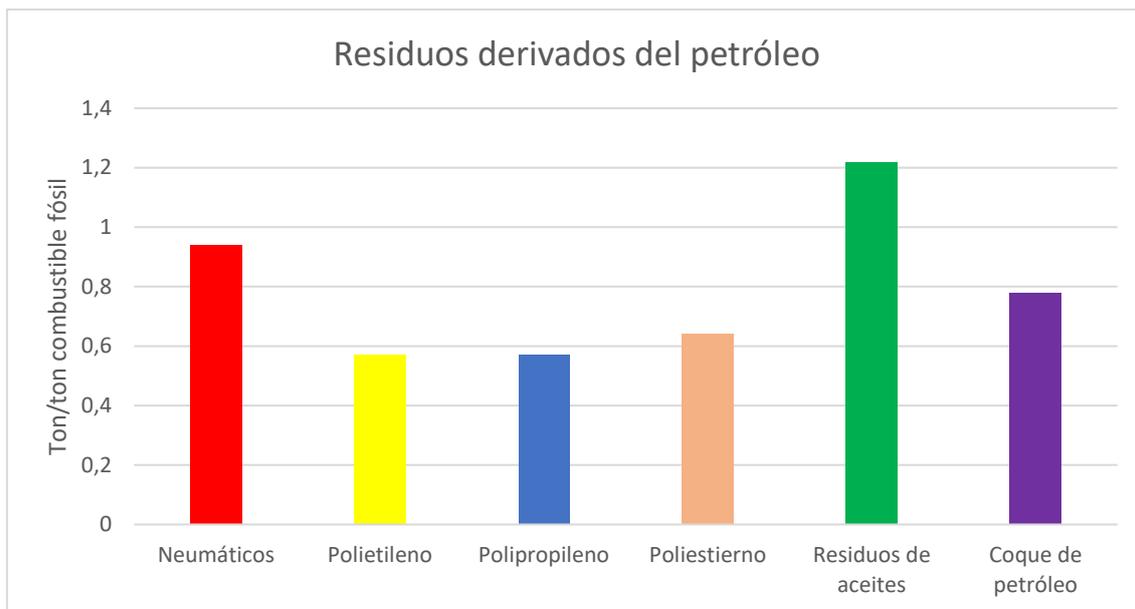


Figura 10. Relación entre la cantidad de combustible de residuos derivados del petróleo necesario para sustituir una tonelada de combustible fósil [45].

- Otros combustibles: Residuos o productos que no se recogen en las categorías mencionadas anteriormente, principalmente procedentes de residuos textiles o de la industria automovilística. En comparación con el carbón, sus emisiones son representados en la tabla 5.

Combustible	ΔCO_2 (ton/ton de combustible sustituido)
Residuos de alfombras de polipropileno	-0.54
Residuos de alfombras de nylon	-0.15
Textiles	0.11
Residuos de la industria automovilística	0.10
Gas de vertedero	-1.02

Tabla 5. Valores de aumento y disminución de CO_2 para combustibles procedentes de otros residuos respecto a combustibles fósiles [45].

En comparación con el carbón, la cantidad necesaria para generar la misma energía es la mostrada en la figura 11 [45]:

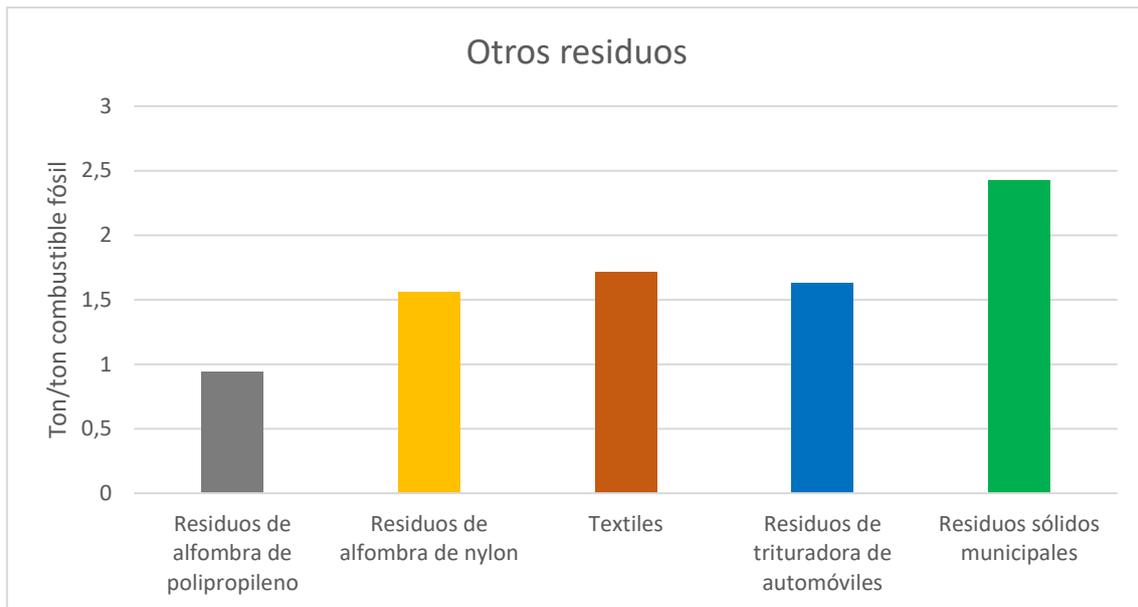


Figura 11. Relación entre la cantidad de combustibles procedentes de otras fuentes necesario para sustituir una tonelada de combustible fósil [45].

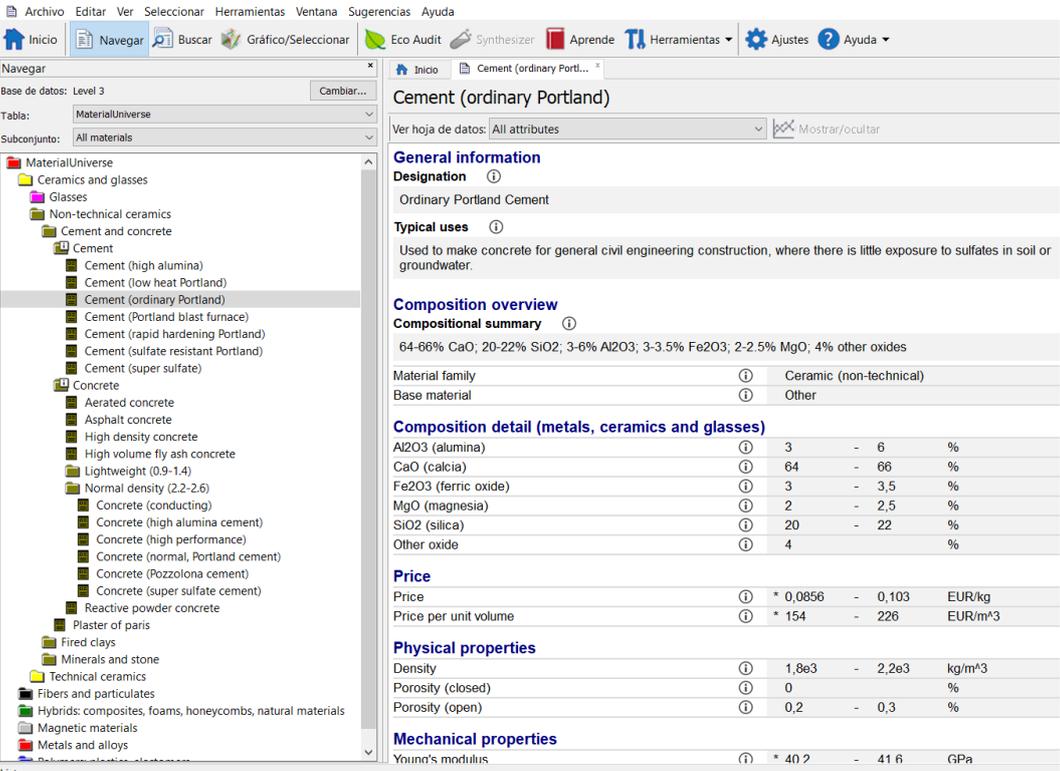
Observando los resultados de la variación en las emisiones de CO₂ en algunos casos, podemos observar que estas pueden llegar a aumentar, lo que puede hacernos creer que estos residuos no deberían utilizarse con este fin. Sin embargo, el principal beneficio que genera su utilización será evitar la deposición y el aumento del volumen de los vertederos, lo que a la larga supone también, una disminución en la huella de carbono. En los casos en los que el uso del combustible, además, provoca una disminución de las emisiones simplemente en su uso, el beneficio sería doble, y el escenario se consideraría el óptimo desde un punto de vista medioambiental.

4. SOFTWARE Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para la realización de análisis de ciclo de vida, lo más común es usar software creados para ello, con los que a partir de datos de entradas y salidas se obtienen distintos valores para cada uno de los factores de emisión y contaminación. Entre los utilizados en este trabajo y los más destacados en su uso por las empresas distinguimos los siguientes:

1. CES o GRANTA EDUPACK

Granta Edupack se trata de un software de selección y análisis de materiales con una extensa base de datos en cuanto a estos. Un ejemplo de estos datos se muestra en la siguiente ilustración:



The screenshot displays the Granta EduPack software interface. The left sidebar shows a hierarchical tree of material categories, with 'Cement (ordinary Portland)' selected. The main window displays detailed information for this material, including its designation, typical uses, composition overview, price, physical properties, and mechanical properties.

General information

Designation
Ordinary Portland Cement

Typical uses
Used to make concrete for general civil engineering construction, where there is little exposure to sulfates in soil or groundwater.

Composition overview

Compositional summary
64-66% CaO; 20-22% SiO₂; 3-6% Al₂O₃; 3-3.5% Fe₂O₃; 2-2.5% MgO; 4% other oxides

Material family	Ceramic (non-technical)
Base material	Other

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Component	Value	Unit
Al ₂ O ₃ (alumina)	3	%
CaO (calcia)	64	%
Fe ₂ O ₃ (ferric oxide)	3	%
MgO (magnesia)	2	%
SiO ₂ (silica)	20	%
Other oxide	4	%

Price

Property	Value	Unit
Price	* 0,0856	EUR/kg
Price per unit volume	* 154	EUR/m ³

Physical properties

Property	Value	Unit
Density	1,8e3	kg/m ³
Porosity (closed)	0	%
Porosity (open)	0,2	%

Mechanical properties

Property	Value	Unit
Young's modulus	* 40,2	GPa

Ilustración 12. Información que proporciona Granta sobre un material ejemplo.

Además de proporcionar una gran cantidad de información respecto a los materiales, tanto de su composición y propiedades, permite obtención de resultados ambientales gracias a su herramienta "Ecoaudit", introduciendo valores de entrada como los materiales, el medio de transporte y datos sobre su vida útil. En la imagen 13, se muestra un ejemplo de cómo se utiliza esta función:

Archivo Editar Ver Seleccionar Herramientas Ventana Sugerencias Ayuda

Inicio | Navegar | Buscar | Gráfico/Seleccionar | Eco Audit | Synthesizer | Aprende | Herramientas | Ajustes | Ayuda

Inicio | Cemento Portland

Proyecto Eco Audit

Definición del producto Informe

Información del producto

Nombre: Cemento Portland

Material, fabricación y fin de vida

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	Cemento Portland	Cement (ordinary Portlan...	Virgen (0%)	1000	Incl. en el valor del material	Vertedero

Transporte

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
Transporte en camión	Camión de 26 toneladas (3	100

Uso

Vida del producto: 10 años

País de uso: Europa

Modo estático
 El producto utiliza la siguiente energía:

Entrada y salida de energía: Eléctrica a térmica

Potencia nominal: 0 W

Uso: 0 días al año

Uso: 0 horas al día

Modo dinámico
 El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Tipo de combustible y movilidad: Diésel - transporte marítimo

Uso: 0 días al año

Distancia: 0 km al día

Informe

Gráfico | Imagen: | Notas: | Buscar... | Borrar

Informe detallado

Ilustración 13. Menú de opciones de la herramienta Ecoaudit.

El análisis de “Ecoinvent” proporciona datos de gran interés como la energía empleada en los procesos y sus emisiones, por tanto, no se trataría de un análisis de ciclo de vida propiamente dicho, pero seguirían siendo valores de alta utilidad. Además, las opciones en cuanto a los distintos medios de transporte del material permiten obtener valores de emisiones en función de la distancia al lugar en el que este va a ser usado, y también podrán emplearse estos propios factores en caso de querer incidir más en el transporte de los materiales si estos provienen del reciclaje o de otras industrias. Una muestra de los resultados obtenidos es la que se observa en la siguiente imagen:

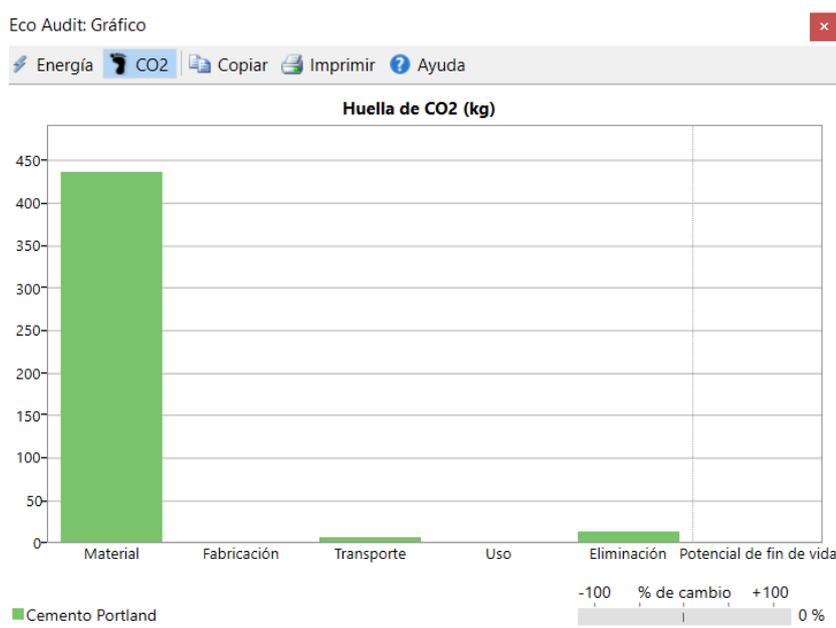


Ilustración 14. Resultados obtenidos a partir de la herramienta Ecoaudit.

2. OpenLCA

OpenLCA es un software gratuito de análisis de ciclo de vida, con gran flexibilidad y diferentes inventarios, cada cual especializado en un ámbito.

Para poder usar el software, primero debe descargarse e instalar un inventario, a partir del cual se podrá trabajar. En la imagen 15 se muestra el menú de opciones del inventario:

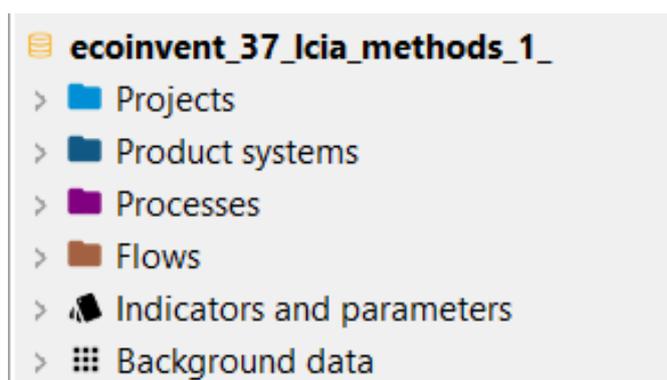


Ilustración 15. Menú de opciones generado en el inventario Ecoinvent.

En el apartado flows o flujos se encuentran los diferentes compuestos o materiales con los que se puede trabajar. Al clicar sobre estos se puede obtener información sobre ellos, por ejemplo, el valor de factores de impacto, como se observa en la siguiente ilustración:

Impact assessment method	Impact category	Impact factor	Unit
CML 2001 (superseded)	resources - depletion of abiotic resources	2.8304E-10	kg antimony-Eq / kg
CML 2001 w/o LT (superseded)	resources w/o LT - depletion of abiotic resources w/o LT	2.8304E-10	kg antimony-Eq / kg
cumulative exergy demand	minerals - non-renewable material resources, minerals	0.01	MJ-Eq / kg

Ilustración 16. Factores de impacto de uno de los materiales en el apartado flujos.

En el apartado de procesos se pueden introducir distintas entradas y salidas para un proceso, así como sus cantidades y otros parámetros. La imagen 17 muestra un ejemplo de esta opción:

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste
Calcite, in ground	Resource/in ground	60.00000	kg		none	
Clay, unspecified, in ground	Resource/in ground	50.00000	kg		none	
Sand, unspecified, in ground	Resource/in ground	30.00000	kg		none	

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...
Cemento		100.00000	kg		none	
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/high populatio...	1.00000	kg		none	

Ilustración 17. Menú de salidas y entradas de la opción de procesos.

Para continuar con el análisis, se hará clic en la opción de “product systems”, con la cual se podrán conectar los distintos procesos de manera automática, tal y como se observa en la siguiente imagen:

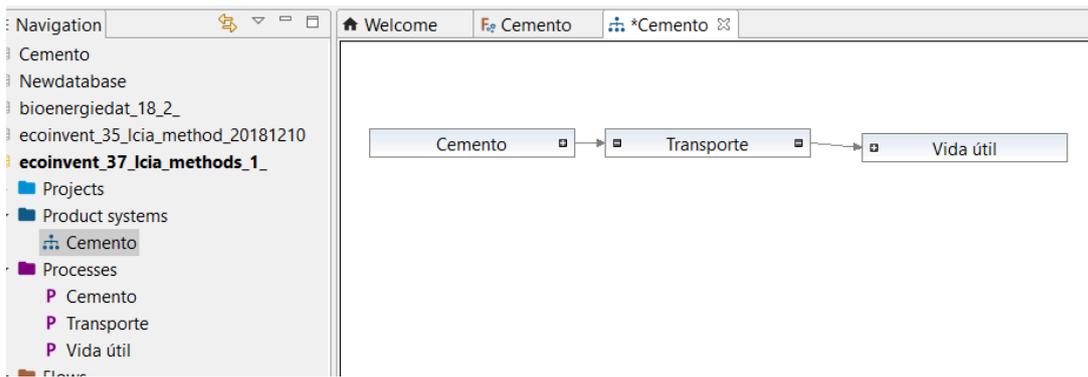


Ilustración 18. Diagrama de un proceso obtenido en el apartado “Product systems”.

Finalmente, para obtener unos resultados, se hará clic derecho en el sistema y se le dará a calcular. Se debe elegir además un método de análisis de impacto entre los que ofrece el software.

Ilustración 19. Menú de cálculo de análisis de ciclo de vida

A pesar de sus ventajas, no se ha podido utilizar para realizar un análisis de ciclo de vida del cemento, debido a que sus distintos inventarios no poseen la suficiente información respecto a las materias primas utilizadas en el proceso.

3. SimaPro.

SimaPro es un software profesional de pago de análisis de ciclo de vida usado en la industria para monitorizar y analizar emisiones de distintas compañías y mercados. Permite obtener resultados como la huella de carbono y de agua, el diseño de producto y generar declaraciones ambientales. Usa las bases de datos más importantes como Ecoinvent o ILCD.

5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Según la Norma ISO 14040, podemos definir el Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) como una técnica empleada para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto. Para ello, es necesario compilar un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretar los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio.

En el análisis del cemento se consideran las emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre como las más importantes en relación con su impacto al medio ambiente.

Para identificar y cuantificar las emisiones de CO₂, se analizarán por separado las distintas etapas en la vida del cemento: proceso productivo, transporte y vida útil.

5.1 PROCESO PRODUCTIVO

Se tiene en cuenta la producción desde la obtención de materias primas hasta la salida del producto de fábrica. Podemos esquemáticamente diferenciar la importancia de las distintas fases del proceso productivo en las emisiones de CO₂ con la siguiente figura:

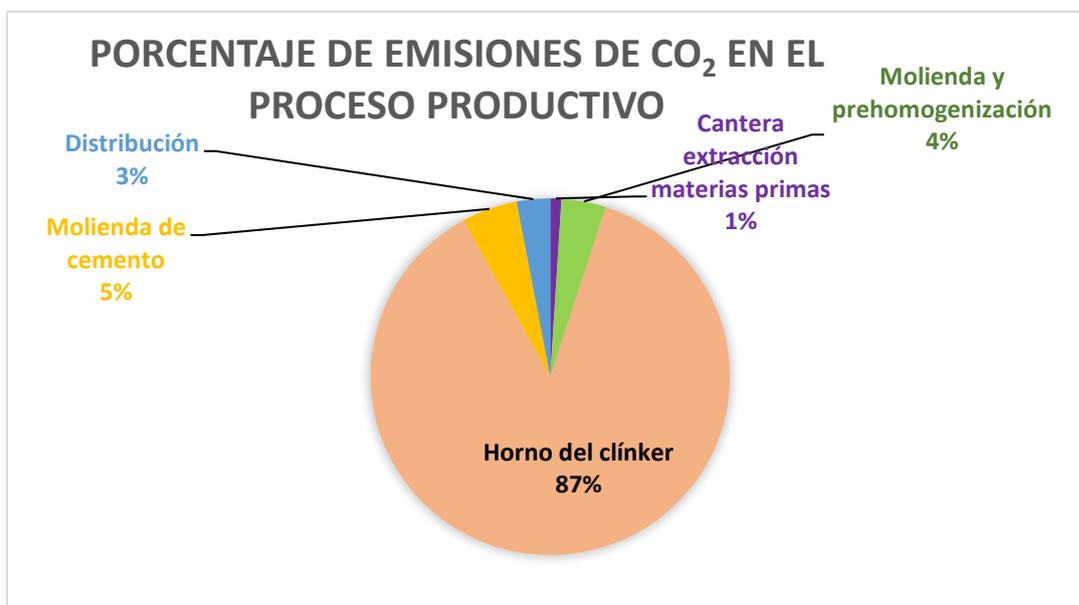


Figura 12. Porcentaje de emisiones de CO₂ en las distintas fases del proceso productivo [46].

Para los datos de entrada se deben tener en cuenta las materias primas y la energía utilizada.

Para realizar un análisis comparativo, en primer lugar, se seleccionarán varios Cementos Portland, que variarán principalmente en su país de origen y los combustibles empleados en su producción, algo que también está relacionado con el lugar en el que se fabrican.

Los cementos Portland con los que se trabajará son:

Nomenclatura cemento	País de origen
Cement Portland I	Países Bajos
Cement CH	Suiza
Cement N	Suecia
Portland cement NL1	Países Bajos
Cement S	Suecia
Cement SF1	Finlandia
Cement SF2	Países nórdicos (Suecia, Dinamarca, Noruega, Islandia y Finlandia).

Tabla 6. Procedencia de los distintos cementos Portland utilizados en el análisis [46].

La siguiente tabla proporciona datos de las distintas materias primas utilizadas en los distintos cementos:

Nomenclatura cemento	Consumo de materias primas (kg)						
	Agua	Caliza	Marga	Arcilla	Pizarra	Óxidos férricos	Otros
Cement Portland I	0,000	1,600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,270
Cement CH	0,000	1,150	0,346	0,000	0,000	0,000	0,000
Cement N	0,000	1,640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Portland cement NL1	1,410	1,600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cement S	0,000	1,360	0,000	0,000	0,046	0,009	0,000
Cement SF1	0,000	1,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cement SF2	0,000	1,550	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 7. Requerimientos de materias primas para producir 1 kg de distintos cementos [47].

En cuanto a los combustibles empleados para su producción, en la tabla 8 se distinguen los distintos materiales que se usan dependiendo del cemento:

Nomenclatura cemento	Consumo de combustibles (g)							Total
	Fuelóleo	Óleo crudo	Carbón	Gas natural	Coque	Fuelóleo residual	Otros	
Cement Portland I	261,60	0,00	0,00	47,46	0,00	0,00	0,00	309,07
Cement CH	45,74	0,00	226,09	5,26	0,00	0,00	0,00	277,10
Cement N	71,60	1,18	84,64	0,00	153,26	42,21	0,00	352,89
Portland cement NL1	261,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	261,61
Cement S	71,60	16,35	84,64	0,00	153,26	42,21	0,00	368,06
Cement SF1	379,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	379,26
Cement SF2	294,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	294,12

Tabla 8. Consumo de distintos combustibles para producir 1kg de los distintos cementos [46].

Los valores de energía necesarios para producir cada tipo de cemento son los mostrados en el siguiente diagrama:

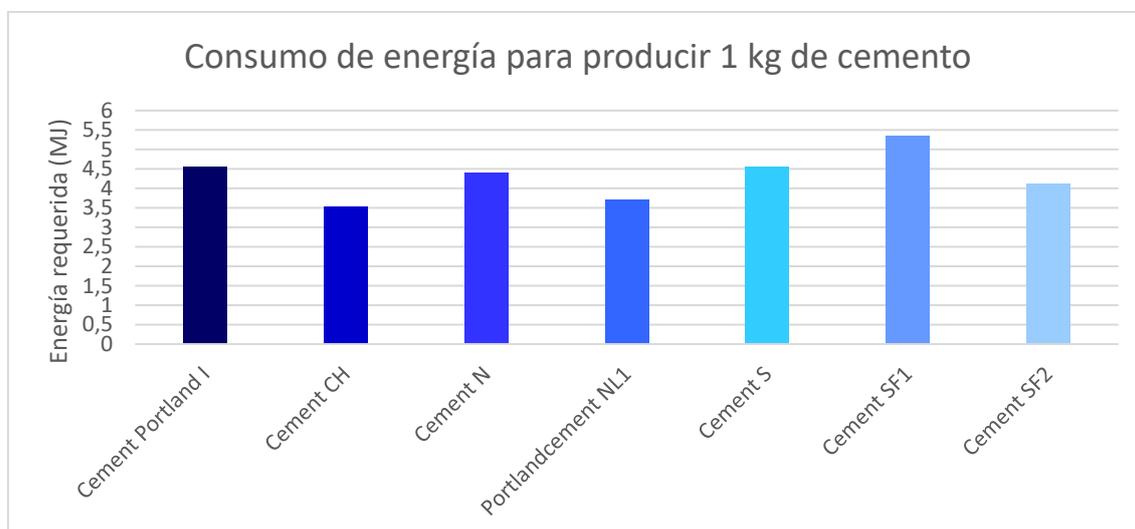


Tabla 9. Valores de energía requerida para producir distintos cementos [47].

Los resultados de las emisiones de dióxido de carbono que se obtienen a partir de los inventarios son los que se observan en la tabla 10:

Nomenclatura cemento	Emisiones de CO ₂ en la producción 1 kg de cemento (g)	Inventario de obtención de los datos
Cement Portland I	350,00	SimaPro
Cement CH	810,00	Cembureau
Cement N	813,00	
Portland cement NL1	853,00	
Cement S	805,00	
Cement SF1	780,00	
Cement SF2	812,70	

Tabla 10. Emisiones de CO₂ en la producción de 1kg de los siguientes cementos [47].

Como se puede observar, se aprecia un valor de emisiones demasiado bajo para el Cement Portland I, el cual es atribuido a errores numéricos o al delimitar el sistema. Por tanto este valor no se tendrá en cuenta en la comparativa [47], [48].

Antes de realizar la comparación con cementos parcialmente sustituidos con MCS, ya se obtienen algunos datos de interés, como que la materia prima mayoritaria usada en estos cementos es la arcilla. Además, también se observa que, a pesar de la utilización de distintos tipos de combustibles fósiles, lo cual podría suponer variaciones en las emisiones, estas son muy parecidas para los distintos tipos de Cemento Portland. Es por ello, que se utilizará un valor medio de 800 g de CO₂ por kg de Cemento Portland producido, para simplificar las comparaciones.

Para comparar los valores de emisiones del Cemento Portland con cemento en el que se ha sustituido una porción de él por cenizas volantes, unas procedentes del carbón y otras de la biomasa se han obtenido las emisiones de hormigones con distintos porcentajes de sustitución de cenizas volantes. La composición de estos cementos para producir 1 m³ de hormigón es, en kilogramos, la mostrada en la tabla 11 [49]:

Porcentaje sustitución \ Material (kg)	0%	20% (carbón)	20% (carbón)	20% (carbón)	20% (biomasa)	20% (biomasa)	20% (biomasa)
Cemento Portland	350,0	280,0	210,0	140,0	280,0	210,0	140,0
Grava	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0
Arena	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
Superplastificante	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
Cenizas volantes procedentes de carbón	0,0	70,0	140,0	210,0	0,0	0,0	0,0
Cenizas volantes procedentes de biomasa	0,0	0,0	0,0	0,0	70,0	140,0	210,0

Tabla 11. Cantidades de materiales para la producción de 1m³ de hormigón [49].

Los valores para producir 1 kg de estos cementos son los expuestos en la tabla 12:

Procedencia de las cenizas volantes	Porcentaje de sustitución de cenizas volantes	Emisiones de CO ₂ para producir 1 tonelada de cemento
Cemento Portland	0	800,00
Carbón	20	662,00
Carbón	40	539,00
Carbón	60	416,00
Biomasa	20	661,00
Biomasa	40	537,00
Biomasa	60	413,00

Tabla 12. Emisiones de CO₂ en la producción de cementos con distintos porcentajes de cenizas volantes [49].

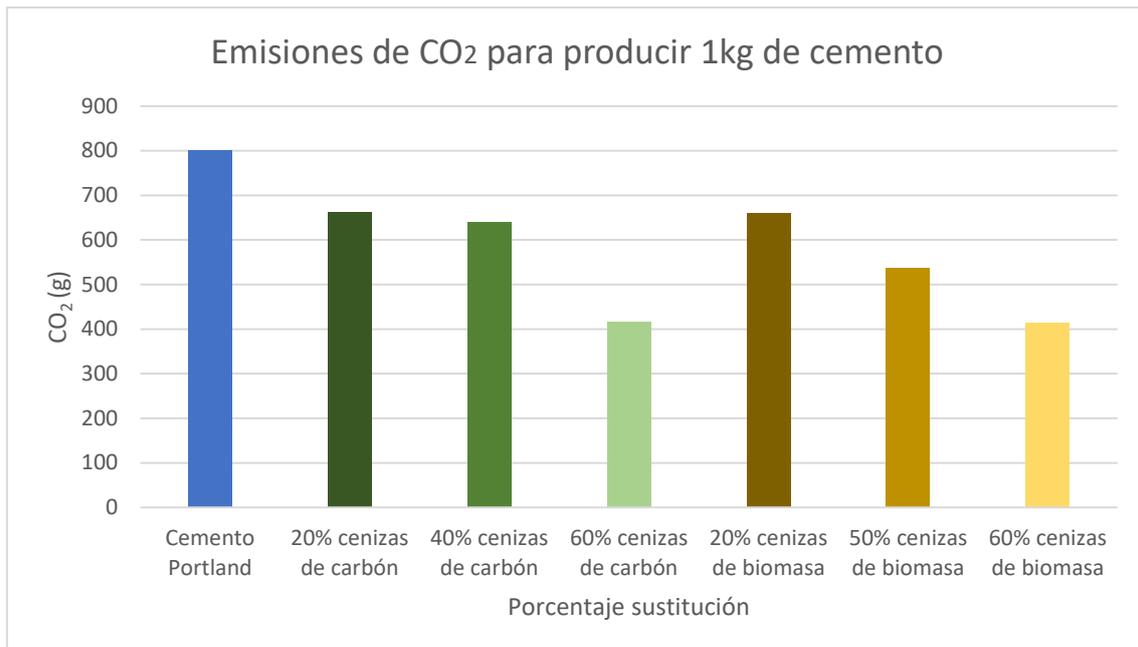


Figura 13. Comparación de emisiones de CO₂ de cementos Portland frente a cementos con cenizas volantes.

Como se puede observar en figura 13, la adición de cenizas volantes como sustitutivo del cemento Portland genera una disminución en la huella de carbono. En términos de porcentajes, se consigue una reducción de en torno a un 17% para sustituciones del 20% de cenizas, de un 30 a un 35% para sustituciones de un 40% y de un 48-50% aproximadamente para sustituciones de un 60%. Sin embargo, también se ven afectadas las propiedades del cemento. Por tanto, lo importante será alcanzar un equilibrio de modo que el beneficio en ambos aspectos sea máximo.

5.2 TRANSPORTE

En lo referente al transporte del cemento, este será realizado por medio de camiones mezcladores de cemento. A partir del software CES, podemos obtener distintos valores de emisiones de CO₂ de estos medios de transporte dependiendo de su peso y número de ejes, tal y como se observa en la tabla 13.

Teniendo en cuenta que la emisión de CO₂ es de 0,072 kg/MJ, podemos calcular la huella de carbono para el transporte de una tonelada de material multiplicando el valor anterior por la energía y por el número de kilómetros que se recorrerán.

En el caso del cemento, los camiones más empleados son los de 3 y 4 ejes, para los cuales obtendríamos unas emisiones de CO₂ 79,20 y 67,78 kg cada 1000 km recorridos.

Tipo de transporte	Energía empleada en el transporte (MJ·km/ton)
Camión de 55 toneladas (8 ejes)	0,71
Camión de 40 toneladas (6 ejes)	0,82
Camión de 32 toneladas (4 ejes)	0,94
Camión de 26 toneladas (3 ejes)	1,10
Camión de 14 toneladas (2 ejes)	1,50

Tabla 13. Valores de energía empleada en el transporte de 1 tonelada de producto

Por tanto, en este aspecto lo más conveniente sería emplear y optimizar el tipo de camión dependiendo de la cantidad de producto a transportar.

Por otra parte, también se debe considerar el transporte de las cenizas volantes a la planta de producción del cemento, ya que a pesar del uso de ellas reducir las emisiones de CO₂, un transporte de largas distancias puede llegar a obtener el resultado opuesto. La tabla 8 refleja el porcentaje de aumento de emisiones de CO₂ de 100km respecto a un transporte de 0km, para distintas cantidades de cenizas volantes [50]:

Categoría de impacto	Sustitución del 25% de FA	Sustitución del 35% de FA	Sustitución del 50% de FA
Calentamiento global Aire, sin carbono biogénico	0,33	0,49	0,89
Calentamiento global Aire, con carbono biogénico	0,22	0,49	0,75

Tabla 14. Influencia del transporte de cenizas volantes en las emisiones de CO₂ [50].

Para observar los efectos del transporte de cenizas volantes de manera más clara, se realizará la comparativa de las emisiones que supondría el transporte de estas respecto al caso sin su uso, a partir de los valores proporcionados por CES Edupack. Para ello se considerará una tonelada de producto final y se compararan distintos porcentajes de sustituciones, utilizando el siguiente caso práctico:

En Noruega, las cenizas volantes que son utilizadas como MCS en el cemento proceden de la quema de carbón, y son exportadas desde Turquía. Las emisiones derivadas de su transporte pueden suponer un problema a nivel medioambiental. Una de las alternativas a este modelo que beneficiaría a este país podría ser la utilización de

cenizas procedentes de biomasa, por ejemplo, de madera y bosques, gracias a la disponibilidad de estas en el localizaciones más cercanas [51].

En primer lugar, se considerará un transporte de 300km de la planta de producción hasta el lugar de uso, lo que supone unas emisiones de 23,76 y 20,33 kg de CO₂ por tonelada de producto.

Las cenizas volantes procedentes del carbón utilizadas en Noruega proceden de Turquía, lo cual supone una distancia de unos 3700km en su transporte.

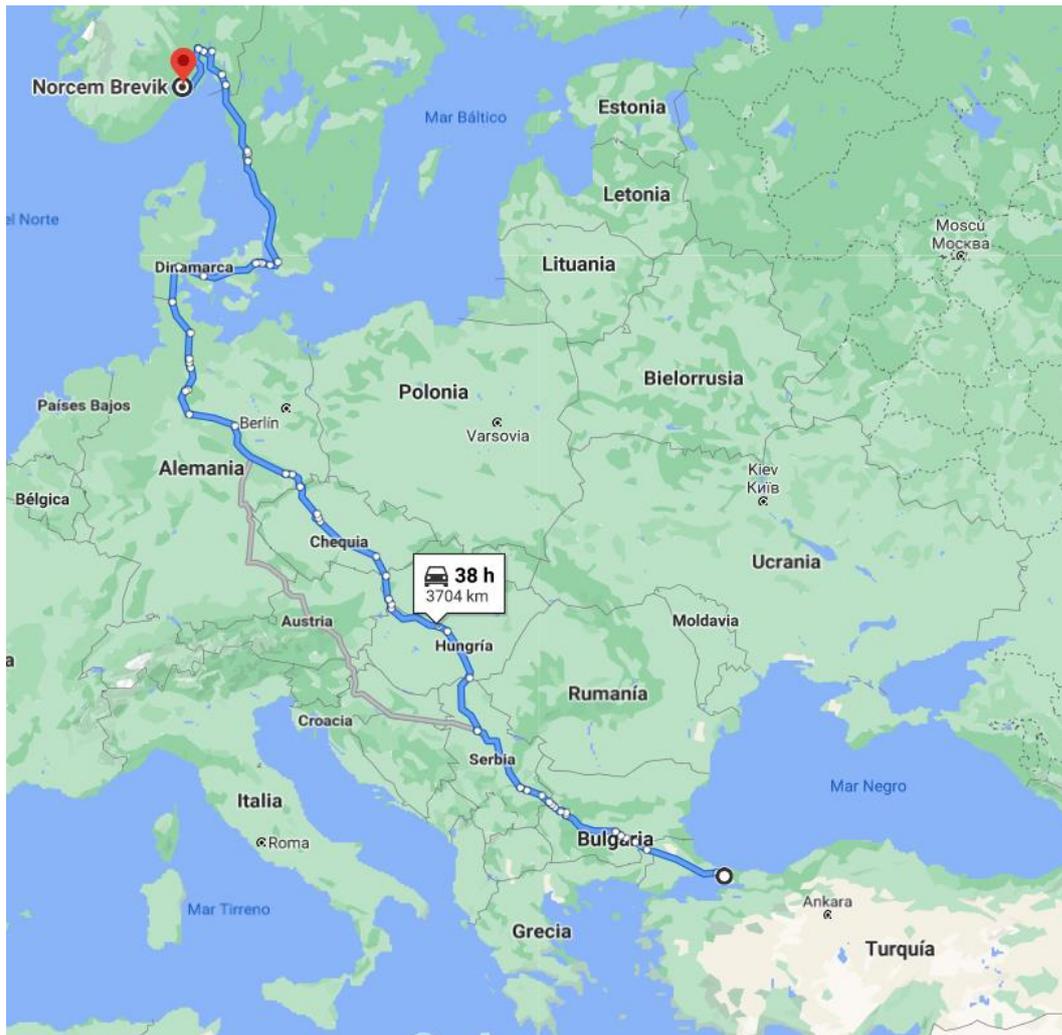


Ilustración 20. Ruta de transporte de cenizas volantes desde Turquía.

Las cenizas volantes procedentes de una planta de biomasa en Noruega suponen un transporte aproximado de unos 200km.

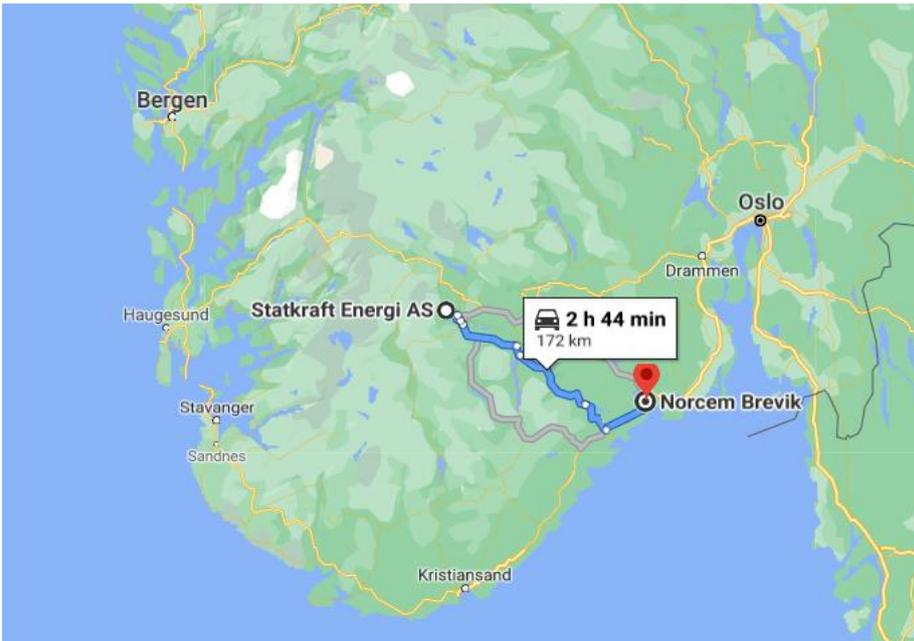


Ilustración 21. Ejemplo de transporte de cenizas procedentes de biomasa.

Para camiones de 3 y 4 ejes el transporte de las cenizas volantes para producir 1 tonelada de producto final supondría:

Porcentaje y procedencia de sustitución de cenizas volantes	Emisiones en el transporte de cenizas en camiones de 3 ejes (kg CO ₂)	Emisiones en el transporte de cenizas en camiones de 4 ejes (kg CO ₂)
0%	0	0
Carbón 20% (200kg)	58,61	50,15
Carbón 40% (400kg)	117,21	100,31
Carbón 60% (600kg)	175,82	150,47
Biomasa 20% (200kg)	3,16	2,71
Biomasa 40% (400kg)	6,33	5,42
Biomasa 60% (600kg)	9,50	8,13

Tabla 15. Valores de emisiones para distintos medios de transporte de cenizas volantes.

Por tanto, la adición de emisiones que supondrá la utilización de cenizas volantes en lo respectivo al transporte en este caso será el presentado en las figuras 14 y 15.

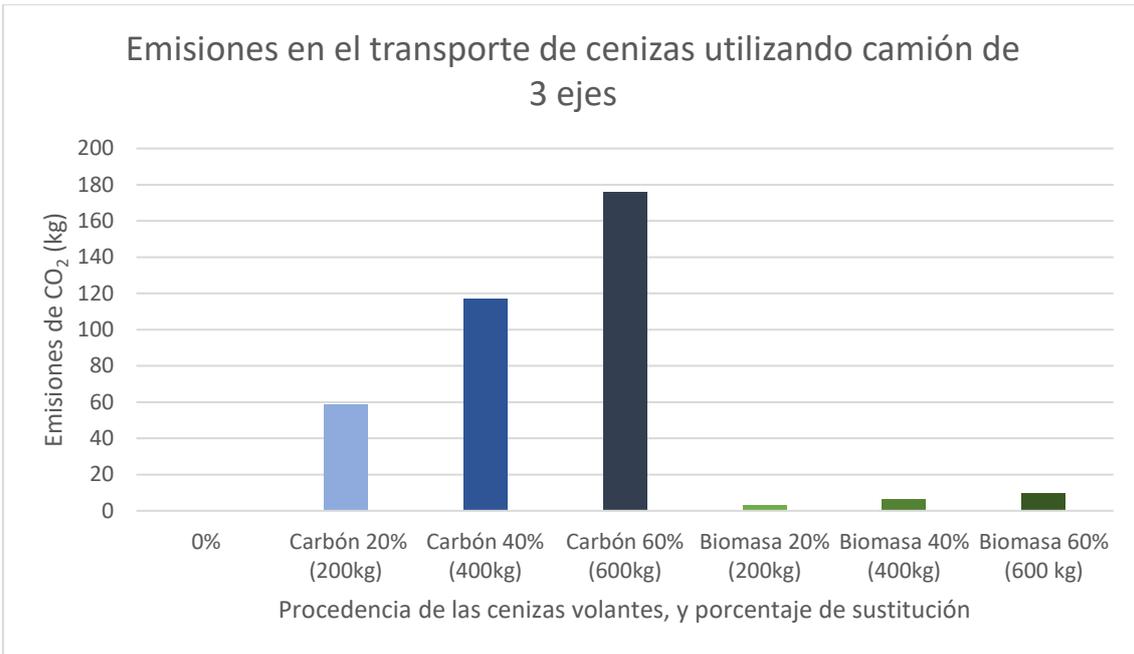


Figura 14. Emisiones en el transporte utilizando camiones de 3 ejes.

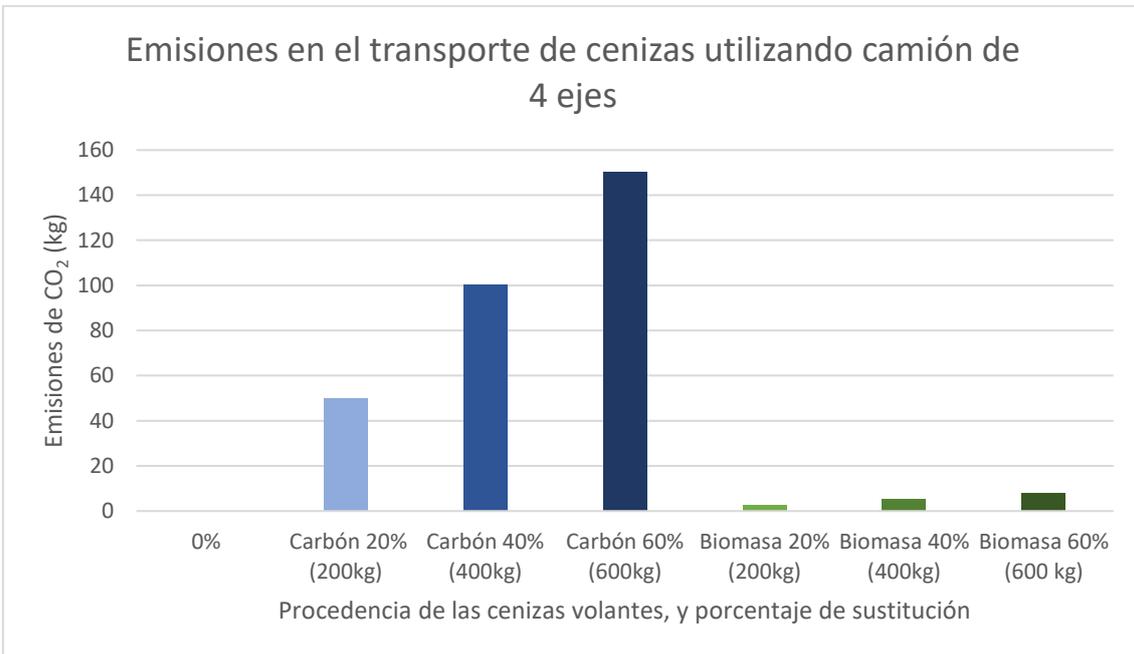


Figura 15. Emisiones en el transporte utilizando camiones de 4 ejes.

Como se observa, el transporte en largas de las cenizas volantes puede generar altas cantidades de emisiones, que pueden suponer incluso un aumento de estas a pesar de la reducción que se consigue con el proceso productivo. Es por tanto que este factor es determinante y de alta consideración, más especialmente en casos en los que este transporte de cenizas requiera grandes distancias.

Por otro lado, en el caso planteado, el transporte de cenizas volantes procedentes de la biomasa es capaz de reducir de manera drástica estas emisiones, obteniendo valores muy bajos, los cuales en comparación con los generados en el proceso productivo son poco significativos.

5.3 VIDA ÚTIL Y FIN DE CICLO DE VIDA

Analizar las emisiones de CO₂ durante la vida útil quizás no sea lo más conveniente. El punto de vista que se debe adaptar es las propiedades de durabilidad del hormigón y compararlas, ya que una durabilidad mayor con buenas propiedades supone una disminución en el consumo del cemento, que a su vez supone una disminución en sus emisiones. Además, el tipo del uso del hormigón y el ambiente en el que se encuentre jugarán un papel importante en su duración y vida útil.

Anualmente, en el sector europeo de la construcción se generan 850 millones de toneladas de residuos, siendo aproximadamente el 40-67% hormigón de demolición.

Es por ello, que deberá valorarse en gran medida analizar las posibilidades de estos residuos.

Una de ellas es el reciclaje del hormigón como adición al propio cemento, así reintroduciendo este material de nuevo en el ciclo de producción. Sin embargo la calidad de estas adiciones son inferiores a las de los aditivos naturales, y poseen una resistencia menor a la abrasión [52]. Hay estudios que han conseguido las mismas propiedades para cementos con un 20-30% de agregado de hormigón reciclado [53].

Existen estudios que demuestran la viabilidad y ventajas del uso de Hormigón completamente reciclado. Se trataría de la elaboración de un hormigón con la capacidad de ser reciclado directamente, sin realizar grandes cambios en él. Además, la presencia de cenizas volantes en este lograría una disminución aún mayor del impacto ambiental y, por otro lado, se lograría una reducción de los residuos generados.

Este hormigón debería tener una composición similar al producido convencionalmente, de manera que así no se produzcan grandes cambios en las propiedades del hormigón.

Se ha concluido que, para un hormigón completamente reciclado con alto contenido en Clinker, la reducción de emisiones de CO₂ sería de un 7 a un 35%. Sin embargo, el reciclaje del hormigón también tiene sus desventajas: las principales son el aumento del coste del proceso, así como que los beneficios ambientales están altamente relacionados con la distancia de transporte a la planta de producción de cemento, ya

que puede influir de manera negativa debido a que suele ser mayor que la del transporte a una planta de reciclado [10].

Otras tecnologías relacionadas con el reciclaje del hormigón son la “Advance Dry Recovery” (ADR) y la “Heating Air Classification System” (HAS), encaminadas a producir agregados finos de alta calidad a partir de residuos de hormigón. La primera consiste en un sistema mecánico que clasifica los residuos de hormigón dependiendo del tamaño de sus partículas. Por otra parte la tecnología HAS emplea métodos de separación térmicos y por aire [54].

El proyecto C2CA europeo trabaja en la investigación de un reciclaje del cemento de basado en una demolición inteligente y posterior molienda del hormigón triturado en un molino autógeno para aumentar la liberación de mortero de cemento y usar la tecnología ADR. Uno de sus principales objetivos es lograr el reciclaje in situ [55].

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados y de los distintos estudios que se han encontrado en la bibliografía, se han llegado a una serie de conclusiones:

- Para reducir las emisiones de carbono en el cemento, se realiza una combinación de distintas prácticas con un reflejo directo en la reducción de la huella de carbono. La obtención de Clinker es el proceso en el que más gases de efecto invernadero se emiten.
- Estas combinaciones, y no una única estrategia, son el camino para conseguir una reducción total de las emisiones en la producción y utilización del cemento como material constructivo.
- Las herramientas de gestión de materiales y análisis de ciclo de vida permiten llegar a la conclusión de que existe una escasez de información en los inventarios de algunos softwares gratuitos, o esta información es algo difusa en ocasiones. Por ello, se ha concluido en que complementar esta información con valores bibliográficos es la manera más viable de obtener unos resultados lo más parecidos a la realidad.
- La gran variedad de clases de MCS, así como el creciente aumento de estas, permite suponer una flexibilidad de uso de estas, siendo la principal limitación la disminución de ciertas propiedades en determinados grados de sustitución. Sin embargo, todo señala a que el objetivo es conseguir sustituciones cada vez más altas, de modo que con el paso de los años se logre que estas sean completas.
- El transporte es el factor determinante para conseguir unos resultados eficaces en la utilización de cementos verdes. Por tanto, para una región determinada, lo más conveniente será utilizar los recursos más disponibles en su localización.
- Las cenizas volantes pueden ser una de las soluciones a las altas emisiones de CO₂ en la industria del cemento, más en concreto, aquellas que proceden de la biomasa. Estas presentan beneficios frente a las procedentes del carbón como mayor disponibilidad y aprovechamiento de los residuos de los vertederos.
- Además de la disminución de la huella de carbono, la utilización de los métodos mencionados en el trabajo permite la implementación de residuos, principalmente de biomasa, en la economía circular del proceso productivo del cemento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, y A. Jullien, «Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation», *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, n.º 5, pp. 478-485, mar. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.12.014.
- [2] «cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf». Accedido: may 28, 2021. [En línea]. Disponible en: https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
- [3] K.-H. Yang, Y.-B. Jung, M.-S. Cho, y S.-H. Tae, «Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete», *Journal of Cleaner Production*, vol. 103, pp. 774-783, sep. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.018.
- [4] «Objetivos y metas de desarrollo sostenible – Desarrollo Sostenible». <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accedido may 10, 2021).
- [5] Repentina, «Repentina: NUEVAS TECNOLOGÍAS EN ARQUITECTURA», *Repentina*, oct. 21, 2016. <http://repentinarepost.blogspot.com/2016/10/nuevas-tecnologias-en-arquitectura.html> (accedido jun. 01, 2021).
- [6] «http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf».
- [7] «https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6202/mod_resource/content/1/Hormigon_01._Historia.pdf». Accedido: may 13, 2021. [En línea]. Disponible en: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6202/mod_resource/content/1/Hormigon_01._Historia.pdf
- [8] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, y A. Bahadori, «Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry», *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 142-161, jul. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- [9] A. León-Velez y V. Guillén-Mena, «Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador», *Ambient. constr.*, vol. 20, pp. 611-625, jul. 2020, doi: 10.1590/s1678-86212020000300448.
- [10] M. De Schepper, P. Van den Heede, I. Van Driessche, y N. De Belie, «Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete», *Materials*, vol. 7, n.º 8, pp. 6010-6027, ago. 2014, doi: 10.3390/ma7086010.
- [11] Y. Zhao, M. Yu, Y. Xiang, F. Kong, y L. Li, «A sustainability comparison between green concretes and traditional concrete using an emergy ternary diagram», *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, p. 120421, may 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120421.
- [12] R. Jin y Q. Chen, «An Investigation of Current Status of “Green” Concrete in the Construction Industry», p. 8, 2013.
- [13] H.-H. Hung, «Properties of High Volume Fly Ash Concrete», p. 260.
- [14] «SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE ZEOLITAS A PARTIR DE CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN - PDF Free Download». <https://docplayer.es/49936760-Sintesis-y-caracterizacion-de-zeolitas-a-partir-de-cenizas-volantes-de-carbon.html> (accedido jun. 11, 2021).
- [15] «Concrete without Cement - A Green Alternative Fly Ash», *The Constructor*, feb. 04, 2015. <https://theconstructor.org/concrete/green-concrete-without-cement-flyash-alternative/10667/> (accedido jun. 01, 2021).
- [16] M. Thomas, «Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete», p. 24.
- [17] M. Ahmaruzzaman, «A review on the utilization of fly ash», *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, n.º 3, pp. 327-363, jun. 2010, doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.003.
- [18] G. L. Golewski, «Improvement of fracture toughness of green concrete as a result of addition of coal fly ash. Characterization of fly ash microstructure», *Materials*

- Characterization*, vol. 134, pp. 335-346, dic. 2017, doi: 10.1016/j.matchar.2017.11.008.
- [19] M. Zabihi-Samani, S. P. Mokhtari, y F. Raji, «Effects of Fly Ash on Mechanical Properties of Concrete», *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 8, n.º 2, pp. 35-40, dic. 2018, doi: 10.2478/jaes-2018-0016.
- [20] T. Hemalatha y A. Ramaswamy, «A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete», *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, pp. 546-559, mar. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.114.
- [21] M. McCarthy y R. Dhir, «Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction», *Fuel*, vol. 84, n.º 11, pp. 1423-1432, ago. 2005, doi: 10.1016/j.fuel.2004.08.029.
- [22] O. Karahan, «Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature», *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 898-906, oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.051.
- [23] C. Magureanu y C. Negrutiu, «Performance of concrete containing high volume coal fly ash - green concrete», *New Forest, UK*, jun. 2009, pp. 373-379. doi: 10.2495/MC090351.
- [24] L. Tosti, A. van Zomeren, J. R. Pels, y R. N. J. Comans, «Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 134, pp. 25-33, jul. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.03.004.
- [25] E. R. Teixeira, A. Camões, F. G. Branco, J. B. Aguiar, y R. Figueiro, «Recycling of biomass and coal fly ash as cement replacement material and its effect on hydration and carbonation of concrete», *Waste Management*, vol. 94, pp. 39-48, jul. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.05.044.
- [26] R. Rajamma, R. J. Ball, L. A. C. Tarelho, G. C. Allen, J. A. Labrincha, y V. M. Ferreira, «Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 172, n.º 2-3, pp. 1049-1060, dic. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.07.109.
- [27] L. A. C. Tarelho, E. R. Teixeira, D. Ramos Silva, R. Espinosa Modolo, y J. J. F. Silva, *Characteristics, management, and applications of ashes from thermochemical conversion of biomass to energy*. 2012. doi: 10.5071/20thEUBCE2012-2CV.4.39.
- [28] Z. Syahida Adnan, N. F. Ariffin, S. M. Syed Mohsin, y N. H. Abdul Shukor Lim, «Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete», *Materials Today: Proceedings*, p. S2214785321015200, mar. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.400.
- [29] C. Fapohunda, B. Akinbile, y A. Shittu, «Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review», *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, n.º 2, pp. 675-692, dic. 2017, doi: 10.1016/j.ijse.2017.07.004.
- [30] V. Saraswathy y H.-W. Song, «Corrosion performance of rice husk ash blended concrete», *Construction and Building Materials*, vol. 21, n.º 8, pp. 1779-1784, ago. 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.037.
- [31] R. Siddique, «Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, n.º 11, pp. 923-932, sep. 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.06.012.
- [32] «Microsilica | Humo de sílice», *Dificonsa*.
<https://www.dificonsa.com/portfolio/microsilica/> (accedido jun. 01, 2021).
- [33] S. Sahoo, P. K. Parhi, y B. Chandra Panda, «Durability properties of concrete with silica fume and rice husk ash», *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 2, p. 100067, jun. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100067.

- [34] R. Siddique, «Ground Granulated Blast Furnace Slag», en *Waste Materials and By-Products in Concrete*, R. Siddique, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 1-39. doi: 10.1007/978-3-540-74294-4_1.
- [35] S. E. Chidiac y D. K. Panesar, «Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28days», *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, n.º 2, pp. 63-71, feb. 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.09.003.
- [36] R. K. Majhi y A. N. Nayak, «Bond, durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete», *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 578-595, jul. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.017.
- [37] V. Flores-Alés, V. Jiménez-Bayarri, y A. Pérez-Fargallo, «Influencia de la incorporación de vidrio triturado en las propiedades y el comportamiento a alta temperatura de morteros de cemento», *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 57, n.º 6, pp. 257-265, nov. 2018, doi: 10.1016/j.bsevcv.2018.03.001.
- [38] A. Mehta y D. K. Ashish, «Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review», *Journal of Building Engineering*, vol. 29, p. 100888, may 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100888.
- [39] S. de Castro y J. de Brito, «Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates», *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, pp. 7-14, feb. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.09.021.
- [40] R. Siddique, *Waste materials and by-products in concrete*. Berlin: Springer, 2008.
- [41] «Captura y almacenamiento de CO2».
<http://www.minasyenergia.upm.es/investigacion/co2/cac.1.htm> (accedido jun. 10, 2021).
- [42] D. J. Barker, S. A. Turner, P. A. Napier-Moore, M. Clark, y J. E. Davison, «CO2 Capture in the Cement Industry», *Energy Procedia*, vol. 1, n.º 1, pp. 87-94, feb. 2009, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.014.
- [43] E. I. Koytsoumpa, C. Bergins, y E. Kakaras, «The CO 2 economy: Review of CO 2 capture and reuse technologies», *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 132, pp. 3-16, feb. 2018, doi: 10.1016/j.supflu.2017.07.029.
- [44] M. G. Plaza, S. Martínez, y F. Rubiera, «CO2 Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations», *Energies*, vol. 13, n.º 21, p. 5692, oct. 2020, doi: 10.3390/en13215692.
- [45] A. Murray, «Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector», p. 63.
- [46] A. Cardim, A. Aguado, A. Josa, «Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento- Aportaciones al análisis de los inventarios de ciclo de vida del cemento», Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.
- [47] A. Josa, A. Aguado, A. Heino, E. Byars, y A. Cardim, «Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU», *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n.º 8, pp. 1313-1320, ago. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.020.
- [48] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, y E. Byars, «Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU», *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n.º 5, pp. 781-788, may 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.004.
- [49] E. R. Teixeira, R. Mateus, A. F. Camões, L. Bragança, y F. G. Branco, «Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material», *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2221-2230, ene. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.124.
- [50] D. K. Panesar, D. Kanraj, y Y. Abualrous, «Effect of transportation of fly ash: Life cycle assessment and life cycle cost analysis of concrete», *Cement and Concrete*

- Composites*, vol. 99, pp. 214-224, may 2019, doi:
10.1016/j.cemconcomp.2019.03.019.
- [51] «Table - Waste in Norway by treatment and material. 1 000 tonnes.»
<https://www.ssb.no/182583/waste-in-norway-by-treatment-and-material.1-000-tonnes> (accedido jul. 07, 2021).
- [52] S. Marinković, V. Radonjanin, M. Malešev, y I. Ignjatović, «Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete», *Waste Manag*, vol. 30, n.º 11, pp. 2255-2264, nov. 2010, doi:
10.1016/j.wasman.2010.04.012.
- [53] M. Chakradhara Rao, S. K. Bhattacharyya, y S. V. Barai, «Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load», *Construction and Building Materials*, vol. 25, n.º 1, pp. 69-80, ene. 2011, doi:
10.1016/j.conbuildmat.2010.06.055.
- [54] A. T. Gebremariam, F. Di Maio, A. Vahidi, y P. Rem, «Innovative technologies for recycling End-of-Life concrete waste in the built environment», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 163, p. 104911, dic. 2020, doi:
10.1016/j.resconrec.2020.104911.
- [55] C. Zhang *et al.*, «Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 149, pp. 649-663, oct. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.06.023.