



GRADO EN INGENIERIA DE MATERIALES

Curso académico 2023/2024

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS Y DISEÑO PARA LA REDUCCIÓN DEL CO₂ EN LA
FABRICACIÓN DEL CEMENTO**

Autor: Carlos Salido Bascuñana

Directora: Dolores Escalera Rodríguez

Julio 2024

ÍNDICE.

1. RESUMEN.	Pag 1
2. OBJETIVOS.	Pag 2
3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y TECNOLOGÍA.	Pags 3-47
3.1 Introducción al cemento Portland.	Pags 3-10
3.2 Sustitución de cemento Portland.	Pags 10-36
3.2.1 Puzolanas.	Pags 11-14
3.2.2 Ceniza de cáscara de arroz.	Pags 15-18
3.2.3 Aglutinantes activados con álcalis. Geopolímeros/polímeros inorgánicos.	Pags 19-21
3.2.4 Ceniza volante.	Pags 21-25
3.2.5 Cemento de sulfoaluminato de calcio.	Pags 25-26
3.2.6 Cemento de polvo de mármol.	Pags 26-29
3.2.7 Uso de biocarbono.	Pags 29-33
3.2.8 Uso de vidrio como añadiendo en cementos Portland.	Pags 33-36
3.3 Estrategias de disminución de las emisiones de CO ₂ en el cemento Portland.	Pags 36-43
3.3.1 Uso de combustibles alternativos.	Pags 36-39
3.3.2 Calcinador solar.	Pags 40-43
3.4 Tecnologías de almacenamiento y captación de dióxido de carbono.	Pags 44-45
3.4.1 Lavado con aminas.	Pag 44
3.4.2 Ciclo de carbono.	Pag 44
3.4.3 Óxido-combustión.	Pags 44-45
3.5 Reciclaje del cemento.	Pags 45-47
4. PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGÍA.	Pags 48-50
4.1 Planteamiento del análisis de ciclo de vida.	Pag 48
4.2 Planteamiento de la selección del cemento.	Pags 49-50
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	Pags 51-67
5.1 Análisis del ciclo de vida.	Pags 51-57
5.2 Selección del cemento.	Pags 57-67
6. CONCLUSIONES.	Pags 67-70
7. BIBLIOGRAFÍA.	Pags 71-74

1. RESUMEN

Este trabajo fin de grado tratará de un análisis descriptivo sobre las diferentes formas de reducir las emisiones de dióxido de carbono causadas por la fabricación de cemento Portland, Además de la búsqueda de los principales focos de emisión de dióxido de carbón durante el proceso de fabricación del cemento y de una selección y comparación entre un cemento Portland ordinario con otras alternativas en el mercado con una menor huella de carbono. Se comenzará por tanto explicando los conceptos básicos del cemento Portland, este es el material más utilizado en el sector de la construcción. Posteriormente se analizará el estado actual aquellas tecnologías capaces de disminuir las emisiones de dióxido CO₂ en la producción de cemento. Aparte del estudio de la disminución del dióxido de carbono causado por estas tecnologías, si así lo permiten, también se estudiarán sus propiedades mecánicas, su durabilidad o su precio con respecto al cemento Portland. Por último se procederá a la realización de un análisis del ciclo de vida de una planta cementera y su producción para averiguar la cantidad de dióxido de carbono emitido para la elaboración de una tonelada de cemento Portland y con la información recogida anteriormente se procederá a la realización de una comparación de cementos entre los que estarán el cemento Portland analizado en el ciclo de vida y otros 3 cementos existentes en el mercado que de una forma u otra tienen una huella de carbono menor que el cemento Portland ordinario. Esta comparación determinará que cemento será el más eficiente en términos de precio, propiedades mecánicas, durabilidad y emisiones emitidas durante su fabricación.

ABSTRACT

This thesis is a descriptive analysis of the different ways to reduce carbon dioxide emissions caused by the manufacture of Portland cement as well as the search for the main sources of carbon dioxide emissions during the cement manufacturing process and a selection and comparison between an ordinary Portland cement with other alternatives on the market with a lower carbon footprint. This thesis will explain the basic concepts about Portland cement, the most widely used material in the construction, as well as its components, properties and processing. Subsequently, the current status of those technologies capable of reducing CO₂ emissions in the production of cement will be analyzed. Apart from the study of the reduction of carbon dioxide caused by these technologies, if they allow it, we will also study their mechanical properties, their durability or their price with respect to Portland cement. Finally, an analysis of the life cycle of a cement plant and its production will be carried out to find out the amount of carbon dioxide emitted for the production of one ton of Portland cement and with the information gathered previously, a comparison of cements will be made between the Portland cement analyzed in the life cycle and 3 other existing cements on the market that in one way or another have a lower carbon footprint than Portland cement, and the other 3 existing cements on the market that in one way or another have a lower carbon footprint than Portland cement.

2. OBJETIVOS

El cambio climático, una de las mayores preocupaciones de nuestro tiempo, está intrínsecamente ligado a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). A medida que la temperatura global aumenta y los fenómenos climáticos extremos se vuelven más frecuentes, es crucial examinar las fuentes de estas emisiones y buscar soluciones sostenibles.

En este contexto, la producción de cemento emerge como un actor clave en la contribución al cambio climático. Aunque el cemento es esencial para la construcción de infraestructuras y edificios, su proceso de fabricación es intensivo en energía y libera grandes cantidades de CO₂. Desde la extracción de materias primas hasta la cocción en hornos, cada etapa del ciclo de producción tiene un impacto ambiental significativo.

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es la recopilación de datos y el análisis de estos para evaluar el impacto ambiental de la industria cementera y la búsqueda de materiales cementosos que disminuyan el impacto ambiental generado por el cemento Portland ordinario, el cual es el cemento más usado en la construcción y uno de los materiales más usados del planeta.

Por ello para lograr el objetivo final este trabajo de fin de grado se ha dividido en los siguientes apartados:

- Estudio de los conceptos básicos del cemento Portland, el material más utilizado en la construcción, y sus componentes, procesos y propiedades.
- Análisis del estado del arte y la tecnología de varias alternativas al cemento Portland, que tienen un menor impacto ambiental y una mayor eficiencia energética.
- Comparación de estas opciones en términos de su huella de carbono, su resistencia mecánica, su durabilidad y su trabajabilidad con respecto al cemento Portland ordinario.
- Realización de un análisis de ciclo de vida de una fábrica cementera.
- Selección entre cuatro tipos de cemento para determinar cuál es el más ecoeficiente.

3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y VIGENCIA TECNOLÓGICA

3.1 Introducción al cemento Portland

El cemento es uno de los elementos de construcción más usados del mundo, usado como material adhesivo gracias a una serie de reacciones químicas otorgando las cuales permitirán unir conjuntos de materiales o servir como la base para la creación de hormigón o de mortero. Se trata de un conglomerante hidráulico, es decir un material que en contacto con el agua (y que haya sido debidamente molido y amasado) da lugar a una pasta con capacidad de fraguar y endurecer. Dando lugar así a un material rígido, resistente y estable tanto en agua como en aire. Este endurecimiento es provocado por la formación de productos hidratados debido a la reacción de las materias primas usadas con el agua [1].

El cemento más utilizado, es el cemento Portland, este se basa en la mezcla del polvo de materiales arcillosos, calcáreos y de arena (Sílice o SiO_2). En este caso el material calcáreo es la caliza, CaCO_3 y el material arcilloso está compuesto principalmente por aluminosilicato hidratado, $\text{Al}_2\text{O}_3 * 2\text{SiO}_2 * 2\text{H}_2\text{O}$. Además de los componentes anteriores, también se empleará polvo de óxido de hierro para su creación. [2]

Tabla 1 Composición química del cemento Portland % en masa [1]

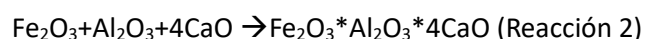
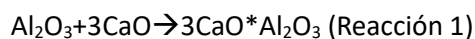
Parámetro	Rango aproximado % en masa
Residuo insoluble	0,1-1,4
Óxido de calcio (CaO)	58,2-65,5
Sílice (SiO_2)	19,6-26,45
Alúmina (Al_2O_3)	4,1-9,5
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	2,1-4,5
Magnesia (MgO)	trazas-2,9
Álcalis (K_2O , Na_2O)	0,1-2,8
Sulfatos (SO_3)	0,1-2,2
Pérdida por calcinación	0,2-2,8

En España, la fabricación del cemento Portland está regulada por la norma UNE-EN 197-1. Esta norma establece la composición química que debe de tener el cemento (tabla 1) además de los componentes del cemento los cuales pueden clasificarse en componentes mayoritarios y minoritarios. El componente principal del cemento es el clínker, el cual se obtiene por la sinterización de la mezcla de caliza, arcilla, arena, óxidos de hierro y otros componentes minoritarios, esta mezcla es calentada hasta llegar a la temperatura de sinterización que dará lugar a la progresiva aparición del clínker. El clínker está formado principalmente por dos terceras partes de silicatos de calcio y una tercera parte constituida por fases compuestas por aluminio, hierro y otros compuestos minoritarios. En cuanto a los componentes minoritarios, estos no podrán superar el 5% en peso y se encargan de mejorar las propiedades físicas del cemento. Una vez fabricado el clínker, se le añadirá yeso $\text{CaSO}_4 * 2\text{H}_2\text{O}$ (o en su versión sin hidratar) cuyo objetivo será controlar el fraguado del cemento una vez reaccione con el agua formando ahora sí el cemento Portland. El yeso está limitado al 3,5% o al 4% en masa para evitar variaciones de volumen que afecten a la estabilidad del cemento. Los aditivos, no podrán superar el 1% en masa (o del 0,2% si son orgánicos) y además no podrán perjudicar las propiedades del cemento o la corrosión de elementos metálicos que pueda haber en hormigones armados.

3.1.1 Proceso de obtención del polvo de cemento

La fabricación del cemento Portland comienza con la pulverización de las materias primas del cemento para obtener el polvo que de partida que se enviará al horno clinker este proceso está explicado en los libros de Sanjuán Barbudo [1] y de Mindess S Young [2]. El polvo se consigue gracias a la molienda de las materias primas. Una vez hecho esto, se deberán mezclar entre sí en un proceso llamado homogeneización. En esta etapa se mezclará el polvo generado en la pulverización además de conseguir un tamaño de polvo más fino facilitando las reacciones en el horno Clinker. La homogeneización, podrá realizarse por 4 vías distintas según el contenido de agua que usen, una vía húmeda en el que se da la molienda en presencia de agua, la vía semihúmeda donde se usa entre un 20 y un 15% de agua, la vía semiseca en la que se emplea entre un 12 y un 14% de agua y una vía seca en la que se no se usa agua o se usa una cantidad reducida. El agua ayuda a favorecer el contacto entre polvo favoreciendo un tamaño de polvo más fino con el costo de una peor trabajabilidad. Sin embargo, el hecho de que conferir humedad al polvo, hace que se necesite un tratamiento de secado por lo que se tendrá que aplicar más calor en el horno para secar la mezcla, aumentando el costo en la producción del cemento debido a un mayor consumo de energía. Una vez homogeneizado el polvo, se realizará un proceso de quemado. La mezcla será tratada en un horno donde se someterá a un proceso de sinterización, la mezcla será calentada gradualmente hasta una temperatura en torno a los 1400°C/1600°C, donde la mezcla se transformará en el clinker de cemento dándose las reacciones 1, 2, 3, 4 y 5. Finalmente, el clinker de cemento será enfriado y mezclado con yeso para ser molido de nuevo obteniéndose así el polvo.

Durante el proceso de quemado se producen todas las reacciones químicas que dan lugar a los componentes principales del cemento. Según Sanjuán Barbudo [1], Mindess [2] y Betancourt Rodríguez [3], el proceso de calentamiento comienza con el secado del agua libre que puede almacenarse en el polvo, esto sucede hasta los 200°C, al traspasar esta temperatura hasta los 700°C se produce la eliminación del agua en los compuestos hidratados como en la arcilla (silicato de aluminio hidratado), es decir del agua que forma parte de la estequiometría del material. Al llegar a los 700°C se da lugar la calcinación, que sucede la descomposición del $CaCO_3$ en CaO y CO_2 y la descomposición del mineral arcilloso deshidratado de $Al_2O_3 * 2SiO_2$ a Al_2O_3 y SiO_2 . Al llegar a los 1100°C y hasta los 1250°C se produce la formación de los aluminatos y ferritos además de un silicato de calcio, esto es debido a la combinación del CaO y el Al_2O_3 , SiO_2 y el Fe_2O_3 libre, para la formación del aluminato tricálcico (C_3A), el ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) y el silicato dicálcio (C_2S) (reacciones 1 2 y 3). La siguiente etapa de clinkerización corresponde a los rangos de temperatura entre 1300 y 1450°C, en este rango se produce la sinterización además de la fusión del C_3A y el C_4AF los cuales actúan como fundente y facilitan la disolución de la belita (C_2S) y la CaO libre, además de la reacción del CaO con la SiO_2 (reacción 4) restante, a los 1300°C se formará belita β (C_2S) mientras que a los 1450°C se producirá alita (C_3S) (reacción 5). La descripción gráfica de la formación del clinker se puede observar en la figura 1. Finalmente la mezcla se enfría y almacena para obtener el clinker, cuya composición en masa puede observarse en la tabla 2. Tras esto se realizará un último proceso de molienda obteniéndose finalmente el cemento, esta etapa es altamente energética y es capaz de deshidratar el yeso causando un falso fraguado. La función del yeso es la de controlar el tiempo de fraguado del cemento una vez se dé la hidratación.



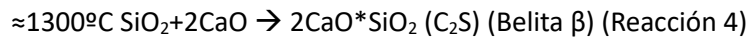
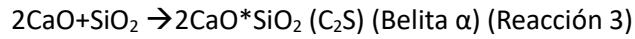


Tabla 2 Composición en % del clínker en masa [1]

Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango % en masa	Valor medio % en masa
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ S	46-79	61
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_3$	C ₂ S	5-30	15
Ferrito aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF	4-16	8
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A	6-18	12
Cal libre	CaO	C	0,1-4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	M	0,7-1,5	1,5

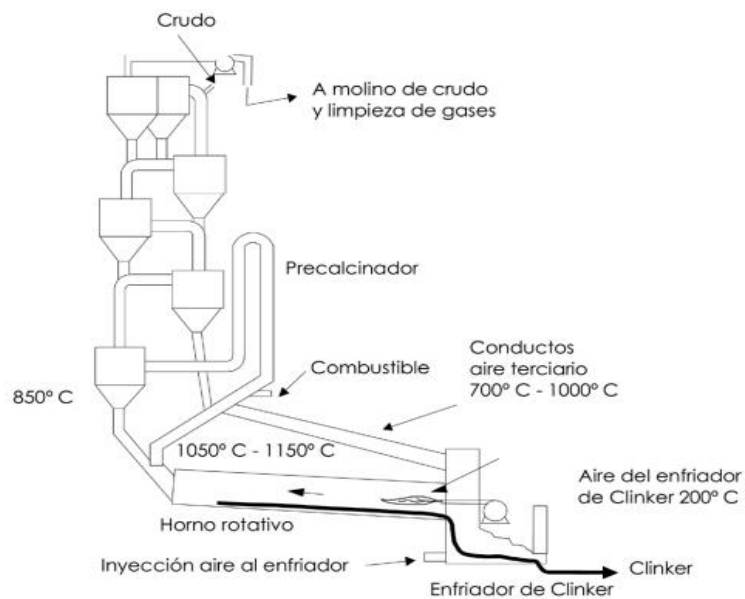


Figura 1 Esquema del proceso de formación del clínker en horno.

A partir de ahora dado que se hablará de compuestos con una estequiometría compleja, se determinará una abreviatura descrita en el libro Concrete [2] para para permitir referirse a ellos de forma más sencilla, en esta abreviatura la C corresponderá al CaO, la S al SiO₂, la A al Al₂O₃, la F al Fe₂O₃ y la S para el SO₃ y H para el H₂O, con estas abreviaturas se podrán abreviar la nomenclatura de compuestos como la belita C₂S, la alita C₃S y otros compuestos como el aluminato tricálcico C₃A o el ferroaluminato tetracálcico C₄AF.

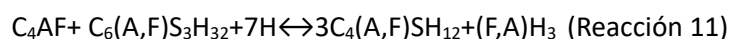
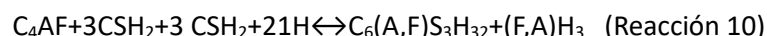
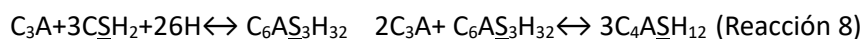
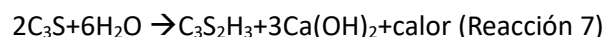
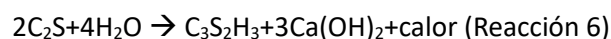
3.1.2 Proceso de hidratación del cemento

Para explicar el proceso de hidratación, este proyecto se basará en la información suministrada por los libros Concrete [2] y Materiales Para Ingeniería Civil [4]. En ellos se describe que la hidratación como la reacción del cemento con el agua, comenzando en el mismo momento en el que se produce dicha mezcla. Durante este proceso se realizará por tanto la disolución del C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF y del yeso o $CaSO_4 \cdot H_2O$ al cual se le denominará como CSH_2 . Cabe destacar este proceso exotérmico, es decir que libera energía en forma de calor, esto es un factor importante a tener en cuenta y debe de ser controlado pues una cantidad excesiva de calor emitido puede dañar la microestructura del cemento final y por tanto afectar a sus propiedades mecánicas.

El proceso de hidratación constará de 5 etapas las cuales denominarán como: hidrólisis, periodo de inducción, aceleración, deceleración y periodo estacionario. El proceso de hidratación comienza con la hidrólisis, que es disolución del cemento con el agua. En esta etapa la disolución esta en un estado pastoso y se da un rápido aumento del calor y dura unos 15 minutos más o menos hasta que se alcanza un máximo en el calor emitido. El siguiente paso en la hidratación es un periodo de inducción, en esta etapa se produce una disminución casi completa de la emisión de calor, la mezcla sigue manteniéndose en un estado pastoso o plástico y el cemento disolviéndose en forma de iones hasta alcanzar una concentración crítica que permita la nucleación de un nuevo compuesto, el silicato de calcio hidratado o CSH que proviene de la disolución del C_3S y del C_2S . Este compuesto es el encargado de otorgar la resistencia mecánica al cemento ya endurecido, este evento inicia el fenómeno de fraguado que es el paso del estado pastoso (plástico) a uno rígido (sólido), etapa dura entre 2 y 4 horas desde la mezcla del agua y el cemento. Una vez iniciado el fraguado, se pasa a la tercera etapa o etapa de aceleración, en esta etapa, el calor emitido o calor de hidratación volverá a crecer hasta conseguir otro máximo debido a los procesos de nucleación y crecimiento de CSH que se dan en esta etapa, el CSH, crece en la superficie del C_3S y del C_2S del cemento haciendo que el cemento pase a estado sólido y terminando así el fenómeno del fraguado pero comenzando uno nuevo, el de endurecimiento, donde el cemento sólido obtiene su resistencia mecánica, esta etapa dura entre 4 y 8 horas coincidiendo con la cuarta etapa de la hidratación, la deceleración. En esta etapa el agua tiene que atravesar la superficie del CSH para poder reaccionar con el C_3S y el C_2S que hay en su interior, aumentando el grosor del CSH y ralentizando la hidratación debido a que forma una barrera física entre el agua y el C_3S y C_2S . En esta etapa el calor de hidratación disminuirá paulatinamente con el tiempo, así como su cinética de reacción, en esta etapa se finaliza el endurecimiento dando al cemento prácticamente su resistencia máxima. Por último, se alcanza la última etapa o etapa de periodo estacionario, en esta etapa la capa de CSH formada en la anterior etapa es tan gruesa que dificulta tanto la entrada de agua que la nucleación y crecimiento de CSH se ve perjudicada debido a una cinética de reacción muy baja y por lo tanto no teniendo unas ganancias de resistencia significativas a lo largo del tiempo. El calor de hidratación sigue disminuyendo hasta prácticamente cero siguiendo la tendencia de la anterior etapa, esta etapa es similar a la anterior, pero con una mayor dificultad del agua para reaccionar con el C_3S y el C_2S restante. Este proceso, puede variar su velocidad en el tiempo en función de la temperatura, aumentando la cinética según el aumento de la temperatura y disminuyendo la cinética según la disminución de la temperatura, donde la tercera etapa es la más susceptible a estos cambios y la quinta la menos afectada ya que tanto en esta etapa como en la cuarta, la reacción empieza a depender de la difusión de agua al C_3S y al C_2S .

Durante la explicación de la hidratación ya se ha adelantado la participación del C_3S y C_2S en la formación del CSH (reacción 6 y 7), siendo los actores más importantes debido a que es el que otorga la resistencia mecánica al cemento, pero no son los únicos participantes en la hidratación. A

continuación, se procederá a explicar la participación de cada uno de los compuestos implicados durante la hidratación. Se comenzará con el efecto del C₃A en la hidratación. El C₃A es de entre todos los compuestos mencionados el más afín con el agua. Este compuesto cuya función inicial en el proceso de quemado es la de fundente para facilitar la formación de C₃S y C₂S, tiene una mayor reactividad con el agua que estos compuestos, por lo que por sí solo perjudica la hidratación del cemento, es por eso que se añade el yeso o C \underline{S} H₂, el C₃A tiene por el C \underline{S} H₂ una mayor afinidad que por el agua por lo que el C \underline{S} H₂ es añadido para que tanto el C₃S como el C₂S posean una mayor cantidad de agua libre para reaccionar durante la hidratación. La interacción entre el C₃A, el C \underline{S} H₂ provoca una reacción junto con el agua que forma un nuevo compuesto llamado ettrignita o C₆A \underline{S} ₃H₃₂ (reacción 8), en caso de que no haya suficiente yeso, esa ettrignita es capaz de volver a reaccionar con el C₃A sobrante para formar monosulfoaluminato o C₄A \underline{S} H₁₂ (reacción 9), esta última reacción es reversible y puede formar nueva ettrignita haciendo que un cemento u hormigón con yeso insuficiente sea susceptible de sufrir ataques por sulfatos. Sin embargo una excesiva cantidad de yeso hace que se forme demasiada ettrignita la cuál sufre un proceso de expansión durante el endurecimiento del cemento que puede romper la microestructura interna del mismo y por lo tanto perjudicándolo. El C₃A además de tener una mayor afinidad por el agua que el C₃S y el C₂S también da lugar a una reacción mucho más exotérmica, por lo que el empleo del C \underline{S} H₂ evita también este fenómeno. El C₄AF, también cumple una función de fundente durante el proceso de quemado, pero en este caso, en la hidratación, no tiene tanta afinidad con el agua como el C₃A y no supone un problema para la hidratación, en este caso el C₄AF forma compuestos similares al C₃A debido a que también reacciona con el C \underline{S} H₂, con la diferencia de que las reacciones que se dan son mucho más lentas y menos exotérmicas. Dado que no forma ettrignita, no tiene la problemática de poder ser susceptible a sufrir ataque por sulfatos (reacciones 10 y 11). Por último, el C₃S y el C₂S son los encargados de otorgar la resistencia mecánica al cemento además de darle su estructura, reaccionan con el agua formando CSH e hidróxido de calcio Ca(OH)₂ (reacción 6 y 7), de entre el C₃S y el C₂S, el primero posee una mayor reactividad con el agua por lo que le es más fácil hidratarse, esto hace que el C₃S forme más rápido CSH y por tanto otorgue al cemento la resistencia inicial mientras que el C₂S al tener más difícil la hidratación influya sobre todo en la resistencia final.



Teniendo en cuenta como se forma el CSH, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de los sulfoaluminatos formados en la hidratación del C_3A y del C_4AF , a continuación se explicará la morfología y la microestructura conjunta de los elementos que conforman finalmente el cemento. Comenzando con el CSH, se trata del componente principal del cemento y actúa como matriz de este. El CSH no posee una estequiometría fija y es principalmente amorfo, está compuesto por partículas muy pequeñas poseyendo una gran superficie específica y es muy difícil de estudiar. Sin embargo se considera que su estructura es una estructura de tipo laminar por capas como la de las arcillas, pero a diferencia de estas, las láminas en la estructura del CSH no tienen una orientación específica, mientras que en las arcillas las capas se ordenan en una disposición tipo “sándwich”, es decir paralelas unas a otras, en este caso no se cumple y las capas en el CSH se ordenan aleatoriamente, entre las capas se encuentra un espacio interlaminar con iones metálicos uniendo las capas por medio de fuerzas electrostáticas, estos espacios interlaminares son considerados como porosidad interlaminar y el secado del cemento puede llegar a formar porosidad intralaminar. En el caso del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ si que se trata de un compuesto cristalino bien definido y forma cristales en los poros del CSH, siempre que haya espacios en ellos y dado que los llega a eliminar, contribuye al aumento en la resistencia mecánica en los cementos. Por último, los sulfoaluminatos de calcio como la ettrignina, forman cristales en forma de aguja. Por tanto la microestructura final del cemento Portland será la de una matriz de CSH que contiene dispersos en su interior $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en un 20-25% en volumen, sulfoaluminatos de calcio en un 10-15% en volumen y de una cantidad pequeña indeterminada de compuestos no hidratados dispersos.

3.1.3 Otra información sobre el cemento

Con todo esto la información aportada por el libro de Materiales Para Ingeniería Civil [4] considera distintos tipos de cementos según su composición química descrita en la tabla 3. Estos cementos son:

- Cemento tipo 1: Cemento Portland ordinario.
- Cemento tipo 2: cemento Portland con resistencia moderada a sulfatos.
- Cemento tipo 3: cemento Portland con alta cantidad de C_3S para una mayor resistencia inicial.
- Cemento tipo 4: cemento Portland con alta cantidad de C_2S para un menor desprendimiento de calor de hidratación.
- Cemento tipo 5: cemento Portland con alta resistencia a sulfatos.
- Cemento puzolánico: cemento con puzolana.

Tabla 3 Composición química de cementos en % en masa

Tipo de cemento	Porcentaje máximo de los compuestos en masa %				Finura de Blaine m^2/kg
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
I	55	19	10	7	370
II	51	24	6	11	370
III	56	19	10	7	540
IV	28	49	4	12	380
V	38	43	4	9	380

Según el artículo de Benhelal, E., Shamsaei, E. y Rashid, M. [5], la fabricación del cemento supone el 5% de las emisiones de CO_2 generadas por el ser humano, siendo el tercer sector que más emisiones genera con 2,038 billones de toneladas de CO_2 emitidas en 2014 y según las predicciones se alcanzarán los 2,34 billones de toneladas en 2050. De esta cantidad de emisiones, entre un 50% y un 60% se genera por la descomposición del CaCO_3 que conforma la caliza para la formación del clinker de cemento, entre

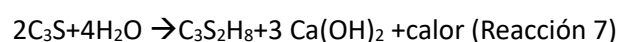
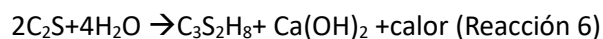
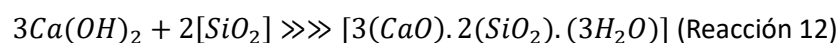
un 30% y un 40% se da por el empleo de combustibles en para la creación del clínker y el restante en operaciones varias. A parte, todos estos valores pueden estar inflados debido al usos de procesos ineficientes en la propia fabrica que causen un uso de energía mayor al que deberían o incluso el uso de maquinaria ya obsoleta, aumentando así la generación de emisiones.

Siendo el cemento uno de los principales materiales de construcción en todo el mundo ya sea usado como aglomerante o como matriz para la formación del hormigón y que su fabricación genera tal cantidad de emisiones, aparece la figura del cemento verde que es cualquier cemento capaz de emitir menos emisiones y/o capaz de emplear una menor energía para su fabricación. Este tipo de cementos pueden ser aquellos en los que se haya implementado productos reciclados o aquel en el que se haya reemplazado parte de sus componentes por componentes alternativos con el fin de conseguir una disminución en las emisiones de gases como el CO₂ como se muestra en el artículo de Sivakrishna, Adesin, Awoyera y Rajesh Kumar [6].

3.2 Sustitución de compuestos en el cemento Portland

Este método se trata del reemplazar componentes del cemento tradicional por alternativas al cemento Portland o por el reemplazo parcial del cemento Portland por materiales cementantes suplementarios que trabajen en combinación con el cemento Portland.

Esta tecnología se basa en la sustitución de ciertos componentes del cemento Portland por materiales alternativos o materiales cementicios suplementantes (MCS) que den lugar a un producto final lo más parecido posible al cemento Portland tradicional. La sustitución de estos materiales es parcial y no suele ser total. Esta sustitución se basa en la formación de reacciones puzolánicas, las cuales se habla de ellas en el artículo de Sivakrishna, Adesin, Awoyera y Rajesh Kumar [6] además del estudio de Ahmed, Kamau, Pone, Hyndman y Fitriani [7] estas reacciones se dan entre el CaOH libre en el cemento (formado por la reacción del CaO y el agua) con las puzolanas, en este caso los MCS (reacción 12). Estas reacciones dependen de la composición química de los MCS y de su área superficial, a menor tamaño de grano y a mayor amorfidad, mayor será su reactividad. Dado que los MCS poseen alto contenido en SiO₂, se produce la reacción entre el hidróxido de calcio y la sílice para formar silicato de calcio hidratado (CSH), este último compuesto, es el mismo generado en la reacción de hidratación del cemento Portland, es decir el compuesto generado al reaccionar el agua con el C₃S, el C₂S y el C₃A (reacción 6 7 y 8), solo que en este caso la reacción es más lenta que en el cemento Portland normal dado que en el cemento Portland se forma durante la hidratación Ca(OH)₂ libre, en este caso lo que se produce es una eliminación de ese Ca(OH)₂ lo que causa un aumento del CSH en la estructura del cemento, aumentando así la resistencia final del cemento y su densidad:



Estos materiales cementantes suplementarios pueden sustituir entre un 10 a un 50% a los materiales tradicionales para la fabricación del cemento.

Entre los tipos de cemento o las adiciones que hacen cumplir lo anteriormente explicado se encuentran.

3.2.1 Puzolanas.

Según Soria Santamaría, F. [8] a puzolana es un material no conglomerante por sí solo pero que en conjunto con otros materiales a temperatura ambiente y en presencia de agua son capaces de crear conglomerantes estables. La mayoría de ellas tienen origen volcánico, aunque puede haber puzolanas de origen biológico viendo las composiciones de estas tanto en la tabla 4 como en la tabla 5.

Tabla 4 Composición de puzolanas naturales en masa.

PUZOLANA	Composición % en masa							
	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
TRASS RENANO	10,1	54,6	17	3,8	3,8	1,9	9	0,4
TRASS BAVIERA	14,5	57	11,4	5,6	6	2,2	3,3	0,2
TIERRA SANTORINI	4,9	63,2	14,2	4,9	4	2,1	6,5	-
SEGGI ROMA	9,6	44,1	17,3	10,7	12	2	4,5	-
S PAOLO ROMA	4,1	45,2	20	10,4	9,9	3,8	6,2	0,3
BACOLI NÁPOLES	4,8	55,7	19	4,6	5	1,3	7,3	-
TRASS RUMANÍA	13,9	62,5	11,6	1,8	6,6	0,7	2,9	-
TOBA CRIMEA	11,7	70,1	10,7	1	2,5	0,3	3,7	-
PUZOLANA JAPÓN	5,6	60,6	18,2	5,3	4,5	1,6	4	-
PUMICITA (EEUU)	4,2	72,3	13,3	1,4	0,7	0,4	7	Trazas
GRAN CANARIA	4,4	60	18,2	4,3	0,9	1	11,1	0,1
TENERIFE	11,6	54,9	16	3	1,8	0,9	9,6	-

Tabla 5 Composición de puzolanas artificiales en masa.

PUZOLANA	Composición % en masa							
	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
Arcilla cocida	1,6	58,2	18,4	9,3	3,3	3,9	3,9	1,1
Pizarra destilada	3,2	51,7	22,4	11,2	4,3	1,1	3,6	2,1
Gaize cocido	-	68	6,4	3,3	1,2	0,8	-	Trazas
Moler cocido	-	70,7	12,1	8,2	2,3	2,2	-	1,5
Diatomita cruda	8,3	86	2,3	1,8	Trazas	0,6	0,4	-
Diatomita cocida	0,4	69,7	14,7	8,1	1,5	2,2	3,2	-
SI-STOFF	16,4	45,8	20,6	8,1	2,9	0,7	-	4,3
Cenizas volantes (Chicago)	1,5	44,2	16,4	22,1	7,1	0,9	4	2,3
Cenizas volantes (Long Island)	11,9	40,3	29,7	12,8	1,6	0,6	1,5	0,9
Cenizas volantes (Inglaterra)	0,9	47,8	32,9	9,1	4,2	1,5	1,9	0,7
Cenizas volantes	7,3	41,5	26,4	13,9	5,3	1,9	1,8	1,7
Cenizas volantes (España)	1,1	36,6	23	28,3	7,3	0,4	-	1,3

La mayoría de estos materiales consisten en una masa amorfa que puede ser vítrea, de fases cristalinas inestables y otras fases cristalinas estables, de estos elementos los únicos con capacidad para realizar reacciones puzolánicas son las fases vítreas y las fases cristalinas inestables. Están compuestas principalmente por sílice y alúmina además de poder contener otros elementos como el calcio o el hierro.

En estudios más recientes como el de Rangrazian [9] en el que, aunque se esté estudiando un caso de hormigón reforzado con fibras, se observa que el uso de las puzolanas (las cuales representan un 15% en peso y cuya composición y tamaño se observa en la tabla 6) provoca una mejora en las propiedades mecánicas incluso sin la presencia del refuerzo (tabla 7 y figura 2). Estos aumentos se dan debido a que los compuestos de la reacción puzolánica actúan como un material de relleno, nucleando en la porosidad de la matriz del CSH y eliminándola a parte estos compuestos al más densos que el CSH ayudan al aumento de las propiedades mecánicas del cemento. Esto provoca una mejor transferencia de carga entre el cemento y los agregados y una mejora en la cohesión de la matriz del cemento hidratado.

Tabla 6 Composición de puzolanas y SF (humo de sílice) MK (metacaolín) FA (cenizas volantes) GGBS (escoria de alto horno molida) SZ (sílice activa) y NZ (zeolita natural)

Composición química (% en masa)	Cemento	Puzolana local	SF	MK	FA	GGBS	SZ	NZ
SiO ₂	22,92	68,98	52,52	52,52	56,73	33,19	62,87	68,4
Al ₂ O ₃	7,41	14,92	19,3	44,65	19,3	15,74	13,46	12,5
Fe ₂ O ₃	3,08	1,93	6,58	1,84	6,58	0,6	1,35	1,32
CaO	57,51	3,34	5,54	0,34	5,54	42,11	2,71	1,51
MgO	4,13	2,82	2,98	0,15	2,98	0,89	2,38	1,4
SO ₃	1,77	0,57	1,12	0	1,12	2,64	0,39	0,45
K ₂ O	0,62	1,07	1,84	2,68	1,84	0,42	1,1	1,3
Na ₂ O	0,31	2,44	0,31	0,04	0,31	0,16	1,9	2,2
Propiedades físicas	-							
Superficie específica (m ² /g)	0,37	1,23	2,54	2,54	0,39	0,44	1,24	0,31
Tamaño de partícula (µm)	9,34	3,3	3,5	3,5	8,72	15,87	3,55	7,72

Tabla 7 Resistencia a compresión PCC (hormigón referencia) S1,5% (refuerzo acero 1,5%) P0,5% (refuerzo propileno) S1%P0,25% (refuerzo acero y polipropileno)

group ID	mix ID	Resistencia a compresión					
		7-d f MPa	14-d MPa	28-d MPa curado agua sumergida	28-d MPa curado condiciones ambiente	56-d MPa	90-d MPa
G1	PCC	23,17	29,62	37,31	35,8	39,49	41,71
G2	Puzolana mineral local	24,12	30,73	38,15	36,87	40,35	42,31
G3	S 1,5%	35,53	44,51	54,11	50,23	57,27	62,18
G4	P 0,5%	26,88	34,12	39,86	34,4	41,61	48,11
G5	S 1% P 0,25%	29,5	38,1	47,74	42,11	49,12	55,75

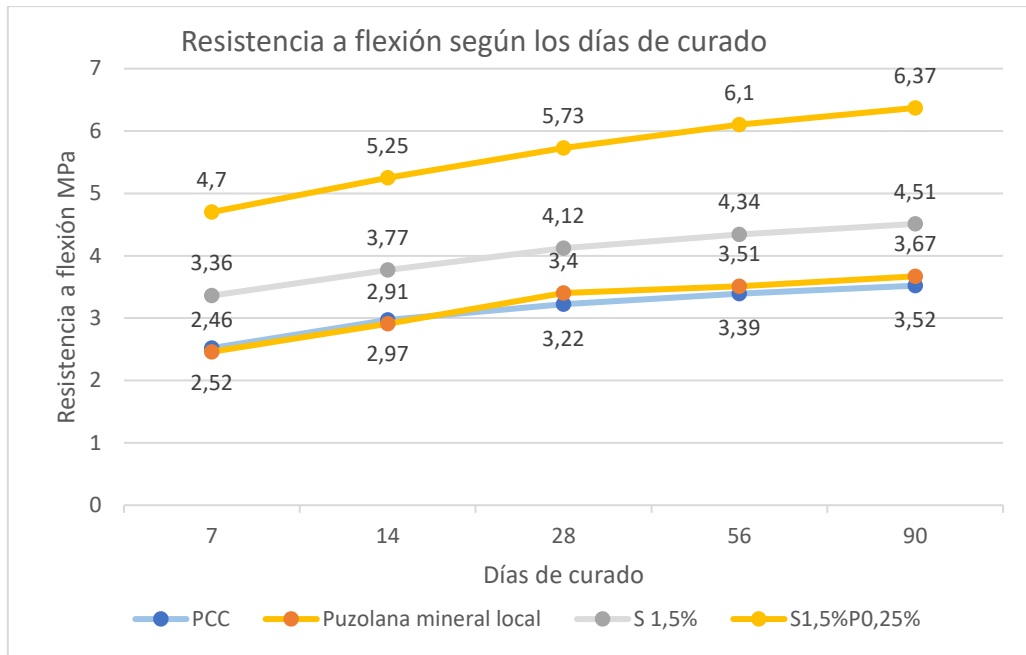


Figura 2 Resistencia a flexión PCC(hormigón referencia) S15% (refuerzo acero 1,5% en masa) P0,5% (% refuerzo polipropileno en masa) S1%P0,25% (% refuerzo acero y polipropileno en masa).

En cuanto a la reducción de las emisiones de CO₂, debido a que las puzolanas son un sustitutivo del cemento Portland, esta sustitución genera que se produzca menor cantidad de cemento Portland ordinario haciendo que por tanto se generen menos emisiones debido a que hay una menor descomposición de CaCO₃ y como se puede ver en la figura 3 un reemplazo de un 15% en masa de puzolana conlleva una reducción de un 15,5% de emisiones de dióxido de carbono.

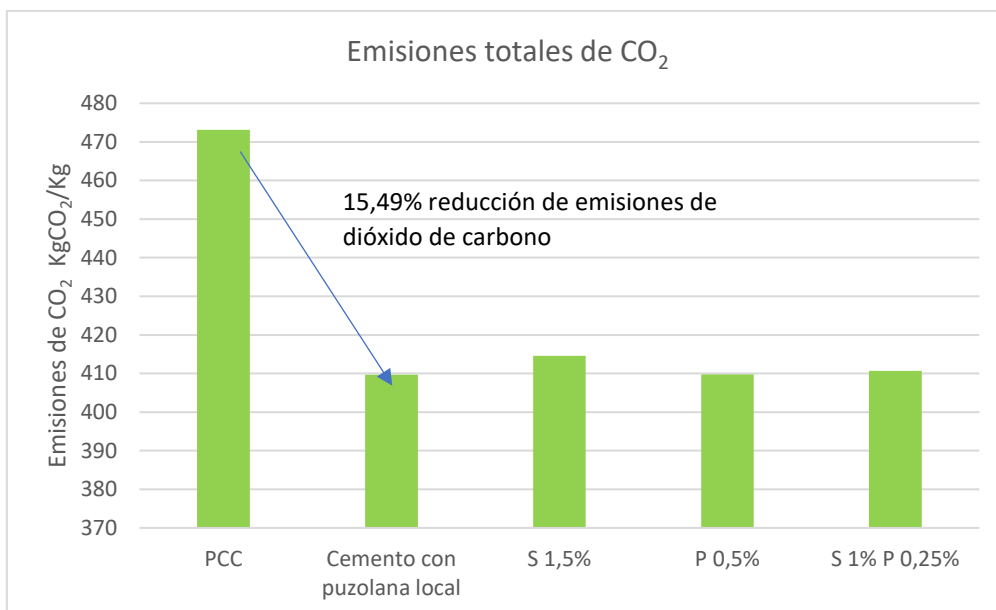


Figura 3 Reducción de emisiones según tipo de cemento.

3.2.2 Ceniza de cáscara de arroz.

En el artículo de Farid y Zaheer [10] se aborda el uso de ceniza de cáscara de arroz (RHA) a partir de la descomposición de la cáscara del arroz dejada por la molienda del mismo, este residuo posee entre un 85 a un 95% de SiO₂ amorfa además de CaO en su composición (como se observa en la tabla 8), haciendo que posea buenas propiedades puzolánicas y por tanto que pueda ser usado como MCS, además de presentar óxidos de aluminio y de hierro, que aun que no tengan importancia en la hidratación de este cemento, ayudan a tener un carácter aglutinante además de permitir la formación de aluminosilicatos y ferritoaluminatos tetracálcicos típicos de los cementos Portland.

Tabla 8 Composición química % en masa de la ceniza de cáscara de arroz

Referencias	Composición de los óxidos % en masa						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
43	0,73	87,89	0,19	0,28	0,47	0,66	3,43
31	0,9	82,6	0,4	0,5	-	-	1,8
44	0,76	93,44	0,21	0,18	0,43	0,05	1,98
38	0,48	87,32	0,22	0,28	0,28	1,02	3,14
45	0,74	85,76	0,25	1,15	0,81	-	-
46	1,04	86,81	0,5	0,87	0,85	0,69	3,61
47	2,88	77,19	6,19	3,65	1,45	0	1,81
48	1,1	93,2	0,4	0,1	0,1	0,1	1,3

Gracias a este material se consiguen reducciones de las emisiones de dióxido de carbono (se necesita menos cantidad de polvo de cemento y por lo tanto se evita la descomposición del CaCO₃) además de mejorar la durabilidad y la resistencia final y de reducir costes en el hormigón. El tamaño de la superficie de la ceniza determinará la capacidad puzolánica por lo que una menor superficie de la ceniza conllevará a mejores comportamientos puzolánicos favoreciendo así la propia reacción puzolánica y durante el procesado de esta ceniza se debe eliminar el carbono contenido en la cáscara del arroz para evitar un descenso en las propiedades del material. La combinación entonces del cemento Portland y la ceniza de cáscara de arroz provoca la formación tanto de CSH como de productos puzolánicos en su microestructura, generando así un aumento en la densidad del cemento y el hormigón cuando esta se emplea entre un 0 a un 15%, sin embargo, a mayores porcentajes de uso se produce una disminución en la densificación, por lo que en el rango entre el 0 hasta el 15% de composición esta ceniza ayuda a densificar al cemento o al hormigón. Como contra, este cemento necesitará más agua que el cemento Portland para producir una hidratación más efectiva (véase en la tabla 9). Como consecuencia de esta densificación, se da un aumento en las resistencias a la compresión, flexión y en la tensión de rotura, esto es debido al menor contenido en poros o el menor tamaño de poros que se puede encontrar en el empleo de la ceniza de cáscara de arroz, esto se aprecia en el estudio realizado por Syahida Adnan, Ariffin, Syed Mohsin y Abdul Shukor Lim cuyos valores de resistencia mecánica en función del porcentaje de reemplazo de RHA se observan en las figuras 4 y 5 donde en la figura 4 se ve el valor máximo de mejora en resistencia a compresión en la sustitución del 15% de RHA.

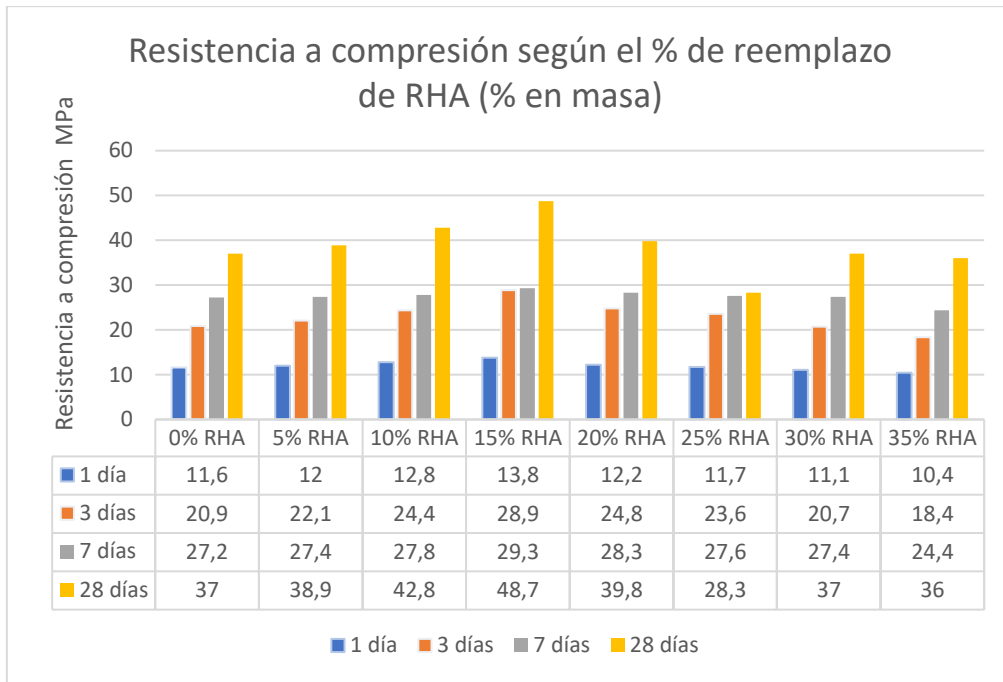


Figura 4 Resistencia a compresión según el porcentaje de reemplazo de ceniza de cáscara de arroz

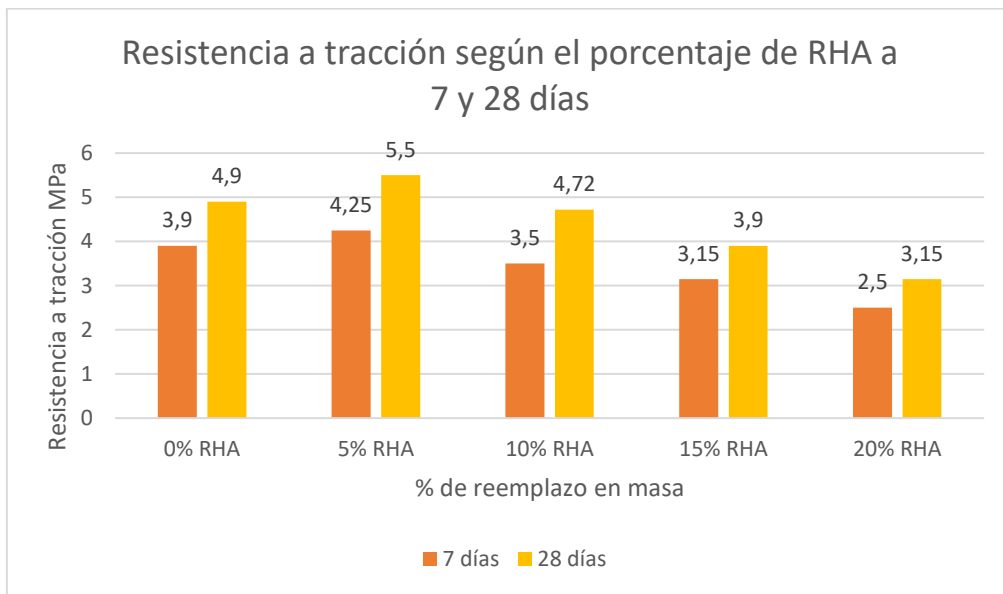


Figura 5 Resistencia a flexión según el porcentaje de reemplazo de ceniza de cáscara de arroz

Tabla 9 Comparación de la densidad entre el cemento Portland y el cemento con ceniza de cascara de arroz

Tiempo curado (días)	Densidad kg/m ³			
	Porcentaje en peso de las puzolanas			
	0% (OPC)	5% (RHA)	10% (RHA)	15% (RHA)
30	2375	2375	2365	2050
60	2360	2390	2380	2100
90	2390	2360	2365	2065
120	2400	2450	2390	2255
150	2385	2475	2445	2085
200	2365	2440	2515	2150

En cuanto a la durabilidad, su gran cantidad de sílice hace que su resistencia ante ataques corrosivos o químicos sea mayor con respecto al cemento Portland. A parte, dado que la porosidad es proporcional al coeficiente de absorción de agua lo cuál se ve en la tabla 10 y en este tipo de cementos la adición de MCS da lugar a una disminución de dicho coeficiente como se ve en la figura 6, la porosidad será menor provocando a su vez un aumento de la durabilidad. Dado que la permeabilidad entonces es menor y existe una menor porosidad, la resistencia a la difusión de cloruros será mayor como se ve en la figura 16. Mismo caso pasa con la resistencia a la carbonatación (reacción 13 reacción del CO₂ con el Ca(OH)₂), la disminución de la porosidad hace que la difusión de CO₂ en este tipo de cemento u hormigón sea menor. Debido a estos factores puede ser usado para la fabricación de hormigón armado debido a que evita la corrosión por ataque de sales y además de que evita que el pH del hormigón, que se encuentra entre 12 y 13 disminuya hasta valores por debajo de 9, efecto causado por la carbonatación en los hormigones armados por lo que se garantiza la pasividad del acero evitando la aparición de corrosión.

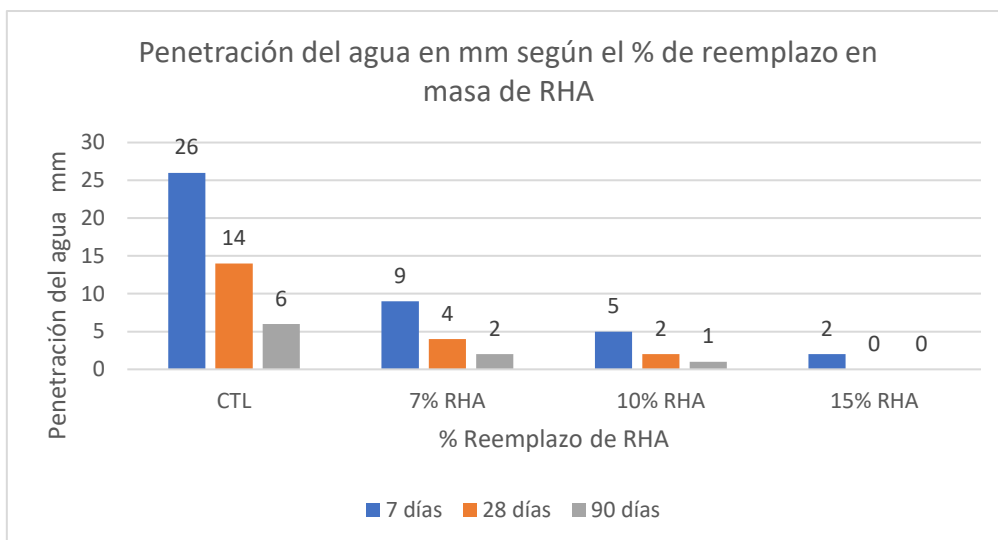
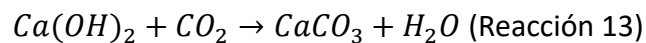


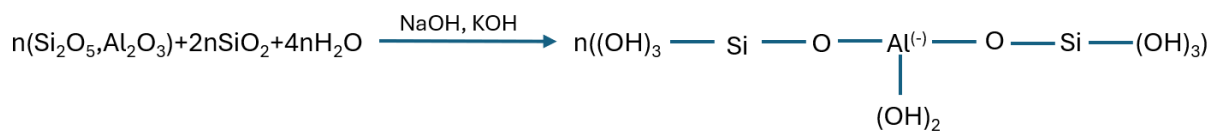
Figura 6 Profundidad de la difusión de agua en días

Tabla 10 Datos sobre el cemento con reemplazo de ceniza de cáscara de arroz

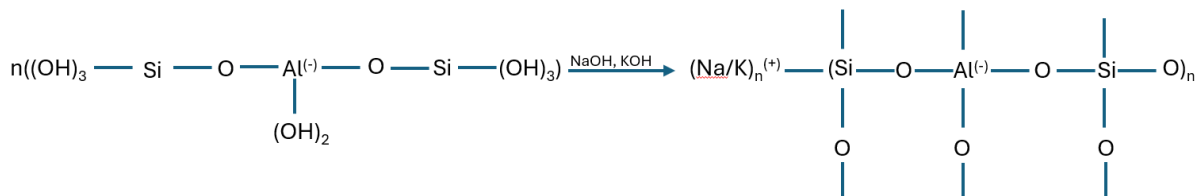
Propiedades	% en masa reemplazo de ceniza de cáscara de arroz					referencias
	0	5	10	15	20	
Absorción de agua %	4,5	4,5	4,1	3,9	3,9	72
	-	4,7	4,9	6,1	-	73
	4,71	4,83	5,02	5,58	5,81	35
Coeficiente absorción agua $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	3,5571	6,7587	1,032	1,0644	1,2122	74
	1,62	1,42	1,03	0,99	0,92	35
Sorción $10^{-6} \text{ m/s}^{1/2}$	11,05	10,6	9,16	7,37	6	35
Flujo de consistencia mm	789	721	715	703	-	73
	740	700	670	610	580	71
	690	700	710	720	710	75
Porosidad %	11	-	10	9	11,5	76
	12,4	10,8	10	11,1	-	76
	-	11,3	11,3	13,4	-	73
Coeficiente de carbonatación $\text{cm/día}^{1/2}$	0,15	0,14	0,13	0,085	0,07	68

3.2.3 Aglutinantes activados con álcalis. Geopolímeros/polímeros inorgánicos

Se trata de una alternativa al cemento Portland que consiste en la reacción de polvo de aluminosilicatos que pueden tener alto contenido en calcio y solución alcalina (hidróxidos de sodio o de potasio y silicatos de sodio o de potasio) para su explicación este trabajo tomará en cuenta los estudios de Charitha, Athira, Bahurudeen y Shekhar [13], Elahi, Hossain, Karim, Zain y Shearer [14], Cong y Cheng [15], Castillo Collado, Droguett, Vesely, Garrido y Palma [16] y el de Lingyu, Dongpo, Jianing y Hongguang [17]. Según estos estudios, la sustitución del cemento Portland por este tipo de cementos puede ocasionar una reducción de hasta el 80% del dióxido de carbono emitido durante la fabricación del cemento Portland con unas propiedades mecánicas similares. El aluminosilicato puede obtenerse a partir del metacaolín, de cenizas de biomasa o de ceniza de carbón. Estos precursores se disuelven en una solución de NaOH o KOH (siendo el hidróxido de sodio la más efectiva) para extraer los átomos de aluminio y silicio contenidos en el aluminosilicato. De esta forma se pueden formar monómeros de silicio, oxígeno y aluminio con el fin de polimerizarlos, para ello esos monómeros tendrán que disolverse en una solución de Na_2SiO_3 o de K_2SiO_3 (Reacciones 15 y 16). Durante la polimerización, el cemento está sometido a un tratamiento de curado, este tratamiento acelera la velocidad de las reacciones y se observa que a mayor tiempo de curado o a mayores temperaturas aumenta la resistencia mecánica. Este tipo de cementos tienen valores de resistencia mecánica muy heterogéneos pues varían según el precursor usado, la temperatura y el tiempo de curado al que se ha tratado el geopolímero, además de las disoluciones empleadas para la disolución y polimerización como se puede observar en las tablas 11 y 12. En cuanto a su resistencia al ataque por ácidos es mayor a la del cemento Portland como se ve en la figura 8, esto se debe a su estructura de tetraedros de sílice y aluminatos que confieren a este cemento una gran estabilidad química debido a que estos dos compuestos son muy estables químicamente. En este caso la reducción de las emisiones de dióxido de carbono se da debido a que no hay CaCO_3 que descomponer térmicamente por lo que no se genera el CO_2 de su descomposición térmica.



(Reacción 15)



(Reacción 16)

Tabla 11 Resistencia a compresión según el precursor de aluminosilicato usado

Precursor aluminosilicato	Activador	Radio L/B	Tiempo curado y temperatura	Resistencia a compresión	
				7 días MPa	28 días MPa
HCFA	Nap	0,25	25°C	-	50
FA+GGBS	Nap	0,4	25°C	-	74,4
FA+GGBS+HMNS	SS+SH	0,5	25°C	-	76,57
FA+bauxita	SS+SH	0,25	80°C 12h	-	45,54
FA+OPC	SS+SH	0,5	24°C	-	76,5
VA+GGBS	SS+SH	0,42	25°C	-	85
Arcilla	SS+SH	0,78	24°C	-	47,77
Halloisita	PA	1,3	80°C 2 días	65	-
FA	SS+SH		80°C 1 día	-	40,42
FA	SS+SH	0,5	25°C	67	-
FA	SS+SH	0,5	80°C 4 h	-	52,75
HCFA+FA	SS+SH	0,5	60°C 2 días	52,5	-
FA+GGBS	NA	0,31	23°C	-	105
FA+GGBS+SF	SS+SH	0,35	90°C 2 días	47	-
GGBS+MK+RHA	SS+SH	0,5	65°C 1 día	-	47,9
CG+GGBS	SS+SH	0,5	20°C	-	57,83
MK+GGBS	SS+SH	0,65	27°C	-	47,84
PFD+GGBS	SS+SH	0,4	20°C	-	69,77
MK+CEG	PS	0,8	22°C	-	97
FA+nano-MK	SS+SH	0,3	70°C 1 día	45	-
MK+RHA	SS+SH	0,7	50°C	-	56
RM+FA	SS+SH	0,45	27°C	-	32,7
CPA+VA	SS+SH	0,47	25°C	-	25
BOT+GGBS	SH	0,5	20°C	-	50
IOT	SH	0,27	100°C	112,8	-
EMDR	PA	0,8	80°C 2 días	96,3 (2 días)	-

Tabla 12 Resistencia a compresión según precursor y activador

Precursor aluminosilicato	Activador	Radio L/B	Caída (mm)	Densidad Kg/m ³	Tiempo curado y temperatura	Resistencia a compresión MPa (28 días)
GGBS	SH	0,35	-	2249	25°C	36
GGBS	SS+SH	0,55	240	2420	23°C	64,4
FA+GGBS	SS+CH+LH	0,45	130	1680	25°C	38
FA+GGBS	SS+SH	-	721	2432	75°C 1 día	52,3
HCFA+RHA	SS+SH	-	-	-	25°C	38,1
GGBS+RHA	SS+SH	0,35	-	-	80°C 1 día	59,7 (3 días)
FA+GGBS	SS+SH	-	100	-	70°C 1 día	64 (7 días)
MK+FA+SF	PS+PH	-	-	-	25°C	80,7



Figura 8 Pérdida de resistencia en presencia de disolución de H₂SO₄ al 5%

3.2.4 Ceniza volante

Esta tecnología es similar a la ceniza de cáscara de arroz con la diferencia de en este caso se emplean los residuos generados en la combustión de carbón en las plantas de energía eléctrica. Estos subproductos pueden ser usados como aditivo o como sustituto parcial del cemento Portland. Según los estudios de Papadakis [18] [19] estas cenizas pueden ser de dos tipos, de bajo contenido en calcio (FL) o de alto contenido en calcio (FH) las primeras son producidas debido a la quema del carbón bituminoso mientras que las segundas son producidas por la quema del carbón lignito. Además, a parte de los estudios de Papadakis, según Nayak, Abhilash, Singh, Kumar y Kumar [20] y de Sathawane, Vairagade y Kene [23] estas cenizas tienen la capacidad de generar reacción puzolánica. Además, pueden producir un aumento de las propiedades mecánicas cuando son añadidas en ciertos rangos de concentración como se ve en la figura 9. En este caso la FL es considerado como puzolana y la FH también pero solo sus partes vítreas y sus fases cristalinas de calcio.

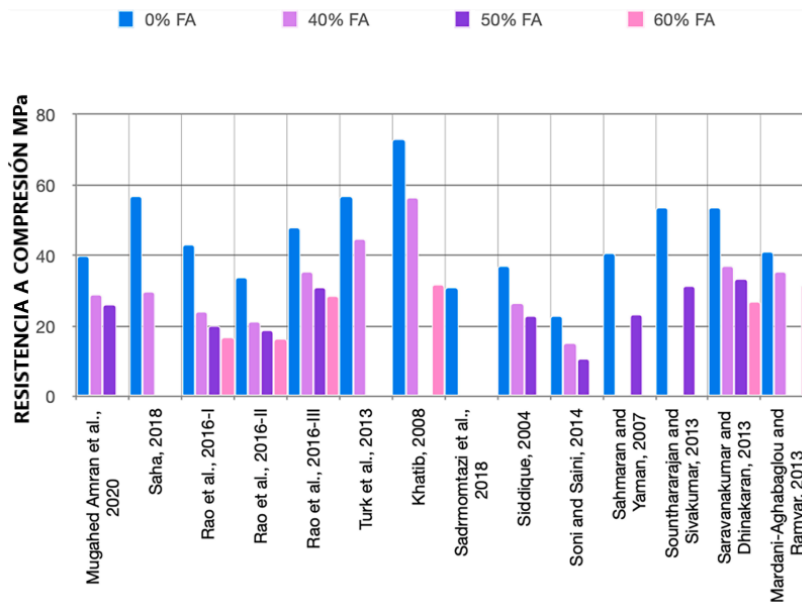


Figura 9 Resistencia a compresión del cemento con ceniza volante tras 90 días [20]

En los estudios de Papadakis sobre la resistencia mecánica de cementos con ceniza volante, en el caso de la FL el contenido en CaO es menor de un 10% y por tanto no participa en el endurecimiento del cemento por lo que necesita la presencia de Ca(OH)_2 para formar productos endurecidos mediante reacción puzolánica puesto que también está compuesta por vidrio de silicato modificado por aluminio y hierro [18], mientras que en el caso de las FH, debido a que su contenido en CaO es mayor al 10% y de que este óxido forma fases cristalinas, posee una mayor facilidad para reaccionar con el agua y formar más Ca(OH)_2 lo que a su vez permite reaccionar con los silicatos existentes produciéndose más reacciones puzolánicas todo esto se puede observar en las figuras 10 y 11.

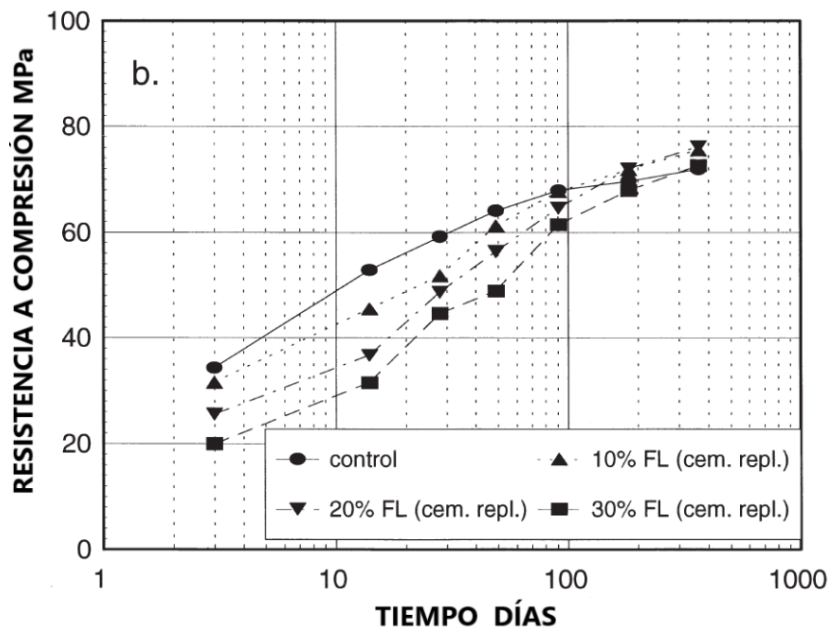


Figura 10 Resistencia mecánica de cementos según % de reemplazo de ceniza volante respecto al tiempo

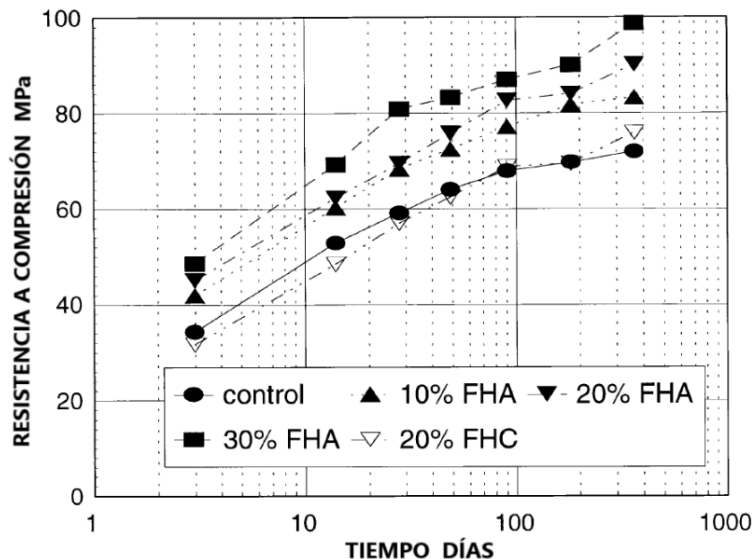


Figura 11 Resistencia mecánica de morteros según % de reemplazo de ceniza volante respecto al tiempo

Los estudios de Kumar [20] profundizan en estudiar además de las propiedades mecánicas otros factores como la trabajabilidad, la consistencia y lo más importante y de lo que se centra este trabajo de fin de grado, de las emisiones de dióxido de carbono producidas durante la fabricación del cemento.

En cuanto a la trabajabilidad debido a que la sustitución del clínker por cenizas volantes supone un aumento de la consistencia esto provoca que se deba usar una mayor cantidad de agua para poder trabajar con este cemento lo que puede significar una mayor proporción de porosidad, algo que a priori es malo para las propiedades mecánicas del cemento, sin embargo, una mayor humedad supone una ventaja a la hora de trabajar con este tipo de cenizas debido al aumento de la plasticidad y de retención de agua que puede adquirir, actuando como lubricante y disminuyendo la fricción entre las partículas de cemento, mejorando la fluidez del mismo, sin embargo a partir de valores mayores al 10% de ceniza se produce una disminución en la trabajabilidad del cemento.

El estudio para justificar la reducción de las emisiones de dióxido de carbono menciona que se debe a la reducción del cemento Portland y por tanto de la producción de clínker, además de que debido a que las cenizas volantes son un subproducto de la combustión del carbón, su uso evita que acabe en vertederos evitando la liberación de CO_2 .

En el estudio de Xiao Chen Shi [22] propone la incorporación de un pretratamiento al cemento con la adición de cenizas volantes con el objetivo de que el cemento obtenga una carbonatación acelerada y así capture dióxido de carbono, eliminando así dióxido de carbono debido al empleo de las cenizas volantes y por la captura del gas en la estructura del cemento. El método consiste en la aplicación de rayos UVA a la pasta de cemento, es decir a la mezcla del polvo del cemento y el agua durante 24 horas. Los rayos UVA consiguen la evaporación del agua del cemento. Esto provoca una carbonatación acelerada pues se facilita la entrada de dióxido de carbono en la estructura del cemento, dando lugar a la formación de CaCO_3 , generando así un aumento en la profundidad de carbonatación y en la formación de una mayor formación de carbonato en el cemento. Este proceso se basa en la reacción de CO_2 y el Ca(OH)_2 para dar carbonato de calcio y otros compuestos minoritarios, acelerando la carbonatación natural que se puede dar en los cementos a lo largo de su vida. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una carbonatación excesiva puede provocar fisuras en el cemento.

En este estudio se ha ensayado un cemento con una adición del 20% de ceniza volante la cual no se especifica siendo sus composiciones químicas las que aparecen en la tabla 13

Tabla 13 Composición del cemento usado en % en masa

Componente	% en masa										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	pérdida
Cemento	21,08	4,91	3,49	60	3,4	0,54	-	0,14	4,31	0,15	1,98
FA	46,18	36,5	4,24	6,27	0,8	0,98	0,71	1,48	0,93	0,32	1,56

Debido a la pérdida de agua en el pretratamiento también hay que tener en cuenta que se da una pérdida de masa del propio cemento. El estudio analiza 3 tipos de cemento, cada uno de ellos con porcentajes de ceniza volante del 0,04, 3 y 20% y separándolos en dos grupos, uno con una carbonatación acelerada sin aplicación de rayos UVA y otro con una carbonatación acelerada con pretratamiento de rayos UVA, como aparece reflejado en la tabla 14. Los resultados revelan que las mayores pérdidas de masa se dan en los cementos tratados por rayos UVA durante el pretratamiento, esto sumado a que durante la carbonatación se da a su vez pérdida debido a la reacción $Ca(OH)_2 + CO_2 \leftrightarrow CaCO_3 + H_2O$

Tabla 14 Pérdida de masa para el cemento según si ha sufrido pretratamiento (NC) o si ha sufrido pretratamiento de rayos UVA (UVC)

Nombre	Pérdida de masa en %	
	Después del tratamiento	Después de la carbonatación
0,04%NC	2,72%	3,88%
3%NC	2,78%	4,10%
20%NC	2,86%	2,74%
0,04%UVC	7,79%	7,60%
3%UVC	7,71%	6,24%
20%UVC	7,88%	3,56%

Esta pérdida de masa inevitablemente conlleva en la modificación de la microestructura del cemento tratado por rayos ultra violeta (UVA), para ello el estudio por medio microscopía electrónica de barrido (SEM) y por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDS), la primera para ver la morfología de la superficie y la segunda para tener un análisis semicuantitativo de la composición del material, a parte también se ha sometido al material a un análisis de difracción de rayos X para determinar de una forma más segura las fases cristalinas que existen en ese material, encontrando que este cemento es rico en fases como la calcita CaCO₃ y otros polimorfos del carbonato de calcio como la vaterita o la argonita, sin embargo, debido a la deshidratación anterior, este cemento es pobre en fases Ca(OH)₂ (la cual irá disminuyendo poco a poco debido a la reacción de descarbonatación) y con valores de C₃S y C₂S más bajos que en un cemento normal que disminuirán según se vayan hidratando. Esto repercute en sus valores de resistencia mecánica, en este caso el elemento que proporciona la resistencia mecánica será el CaCO₃ pero también se observa que a valores mayores del 3% se produce una disminución con respecto a la resistencia mecánica del material por lo que una excesiva carbonatación puede provocar

una disminución de propiedades siendo el 3% de CO₂ la concentración ideal para la formación de este cemento. Esto se puede apreciar en la figura 12.

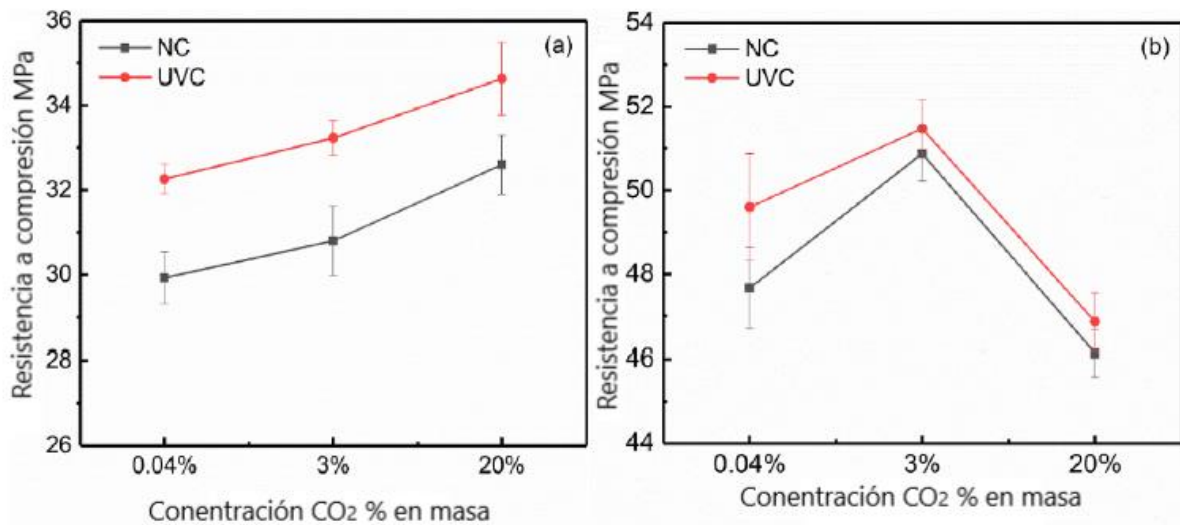


Figura 12 Resistencia a compresión en 3 días y 28 respectivamente en cementos con tratamiento UVA y sin tratamiento [22]

En cuanto a su comportamiento ambiental, aunque el estudio no aporta datos sobre cuanto reduce las emisiones de dióxido de carbono, la capacidad de este cemento para comportarse como un sumidero de dióxido de carbono hace que sea una opción a tener en cuenta a la hora de analizar alternativas al cemento Portland ordinario.

3.2.5 Cemento de sulfoaluminato de calcio

Este caso se trata de un sustituto del cemento Portland ordinario y según el estudio de Zhang, Guan, Wang, Ma, Li, Xu y Jin [27] este cemento tiene como ventajas una menor temperatura de sinterizado a la hora de obtener su polvo de cemento, una menor cantidad de arcilla requerida además de una menor tasa de emisiones de CO₂ durante su fabricación como se puede observar en la figura 13. Este cemento está formado fundamentalmente por C₄A₃S (yelemita). Durante su hidratación se forma estrigina permitiéndole tener así una hidratación y endurecimiento rápido además de una gran resistencia inicial pudiendo comparar sus resistencias a compresión con respecto al cemento Portland ordinario en la figura 14. Sin embargo, para que este cemento sea competitivo con respecto al cemento Portland, se debe emplear la variedad de sulfoaluminato con alto contenido en belemita (BCSA). Esta variedad se caracteriza por un contenido de C₄A₃S de entre el 20 al 30% en peso y un contenido de entre el 40 al 50% de C₂S. Este polvo de cemento se forma por clinkerización o por un proceso hidrotermal seguido de una calcinación a partir de arcilla, yeso y bauxita. El proceso hidrotermal se da en autoclave a 150°C mientras que la calcinación se da en un horno a 1050°C y es más complejo debido a que tiene dos etapas, pero con la ventaja de ser más barato que el proceso de clinkerización del cemento Portland. Dada su rápida hidratación y endurecimiento es perfecto para arreglar cemento en mal estado. En cuanto a su durabilidad, posee una porosidad ligeramente mayor que el cemento Portland por lo que su resistencia a la carbonatación y a la difusión de sales es menor a la del cemento Portland, esto sumado a que posee un pH menor al cemento Portland, no lo hace un buen material para la fabricación del hormigón armado.

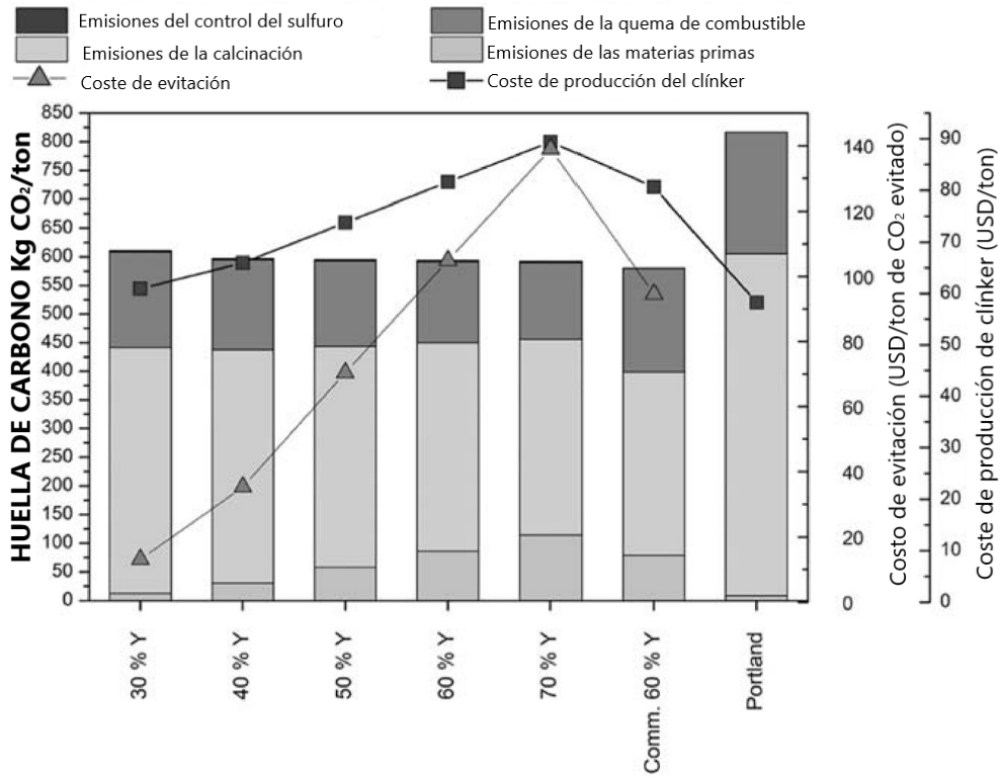


Figura 13 Emisiones y costes según el porcentaje de sulfoaluminato de calcio empleado.

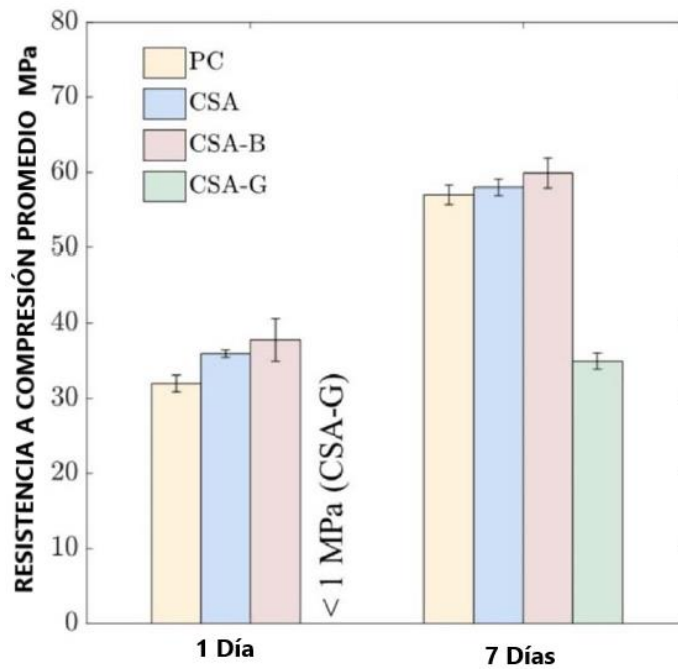


Figura 14 Resistencia a compresión del cemento Portland PC, sulfoaluminato CSA y del sulfoaluminato con aditivos CSA-B CSA-G.

3.2.6 Cemento con polvo de mármol

Según un estudio de Prakash, Saravanan, Kabeer, y Bisht [24], la adición de polvo de mármol aumenta la resistencia mecánica de los cementos si estas adiciones son bajas, además de proveer una mayor densificación del cemento, un aumento de la durabilidad sobre todo en cuanto a resistencia a la penetración de sulfatos, tiene el inconveniente de que puede empeorar su trabajabilidad debido a que el polvo de mármol tiene un tamaño de grano muy fino y por tanto una gran área superficial, en cuanto a su impacto ambiental, según el estudio de Singh, Choudhary, Srivastava, Singh Sangwan y Bhunia [25] una adición del 15% reduce de unos 410 kg/m³ de emisiones de CO₂ a unas 350 kg/m³.

En cuanto a la menor trabajabilidad del cemento, el artículo menciona que, debido la alta superficie específica del polvo de mármol, su capacidad de absorción de agua es lo bastante grande como para absorber más agua que un cemento normal reduciendo la cantidad de agua disponible para que se pueda dar una correcta hidratación. Otra razón de la disminución de la trabajabilidad es debido a que la gran superficie específica de este cemento provoca un incremento de la fricción interna del material, dando lugar que el movimiento entre las partículas de cemento y los agregados de la mezcla tanto en morteros como en hormigones se dificulte. Para mejorar este apartado el documento menciona que se puede aumentar la relación agua cemento, pero esto puede suponer la pérdida de propiedades mecánicas y una disminución de la durabilidad debido al aumento de la porosidad que viene dado por un uso excesivo de agua. Otras formas de mejorar la trabajabilidad que menciona son el uso de aditivos superplastificantes, como los reductores de agua de alto rango que causan una reducción de la fricción interna entre las partículas del mortero o el hormigón y permite una mejor mezcla entre el cemento y los agregados. También se menciona el control del tamaño del polvo de mármol para evitar que sea lo suficientemente fino como para provocar esta disminución de la trabajabilidad, se indica en este estudio que dicho tamaño sería de entre 75 y 150 micrómetros. Por último el empleo del uso de mezclas de cemento modificadas como la adición de la sílice activa que además de mejorar la trabajabilidad (dado que reduce la absorción del agua del polvo de mármol), también produce una mejora de la durabilidad y de la contracción del hormigón, la disminución del agua absorbida por la sílice provoca la disminución de porosidad y la densificación del hormigón, es por ello que se reduce la capacidad de absorción del agua de este cemento y por ello el aumento de su durabilidad.

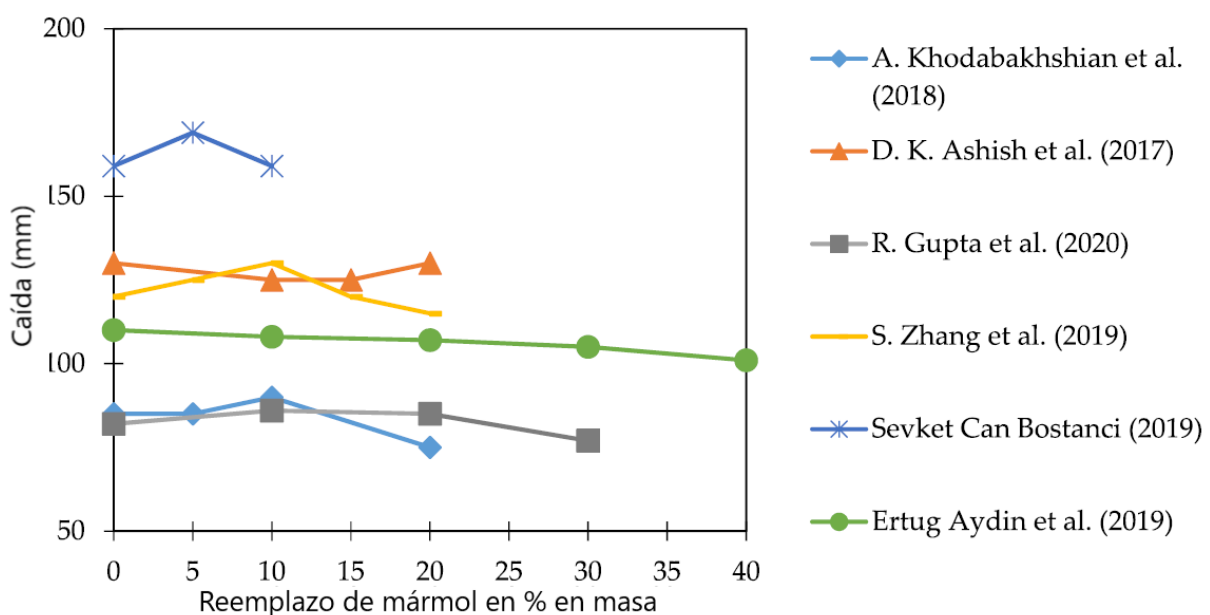


Figura 15 Contracción del hormigón frente % de sustitución en masa [24]

En la figura 15 se muestra la contracción del cemento producida en las pruebas de consistencias hechas por varios autores citados en este estudio frente al porcentaje de reemplazo de polvo de mármol, se ve que los valores de esta contracción del ensayo de consistencia son muy diferentes entre sí, pero esto se debe a las diferentes mezclas usadas por cada autor.

En cuanto a las propiedades mecánicas, aunque el estudio de Prakash [24] citado en este documento menciona que la adición de mármol provoca una disminución de las propiedades mecánicas a menos que se den adiciones bajas, en el estudio Choudhary [25] muestra lo contrario. Esto se debe a la diferencia de cementos usados, mientras que el segundo usa una mezcla de cemento polvo de mármol cenizas volantes y silicio, el primero, usa una mezcla de cemento, polvo de mármol y agua magnetizada. Sin embargo, el estudio realizado por Singh [25][26] muestra la variación de las propiedades mecánicas a diferentes porcentajes de reemplazo y relaciones agua cemento bien definidos. En estudio se observa que se produce una disminución de la resistencia mecánica en general del cemento a la hora de aumentar la relación agua cemento siendo la mejor relación la de 0,35 y que una adición del 15% en masa de mármol (Resistencia figura 17. Composición y otros datos de las mezclas usadas en tabla 15) provoca un aumento máximo con respecto al cemento Portland normal de sus resistencias mecánicas (Misma conclusión que en el estudio de Prakash como se ve en la figura 16). En este estudio para conseguir una relación agua cemento del 0,35 se ha debido requerir el uso de superplastificantes. Este aumento de las resistencias mecánicas, se da debido a que el mármol se comporta como un material de relleno ocupando así los huecos de los poros de la matriz del hormigón disminuyendo así la concentración de los defectos en el hormigón y debido al gran tamaño de su superficie específica que le permite tener una gran reactividad y ayuda a la formación de compuestos de calcio hidratados puesto que el mármol está compuesto de CaCO_3 por lo que actúa como la caliza en la formación del clínker al unirse con los silicatos durante la hidratación.

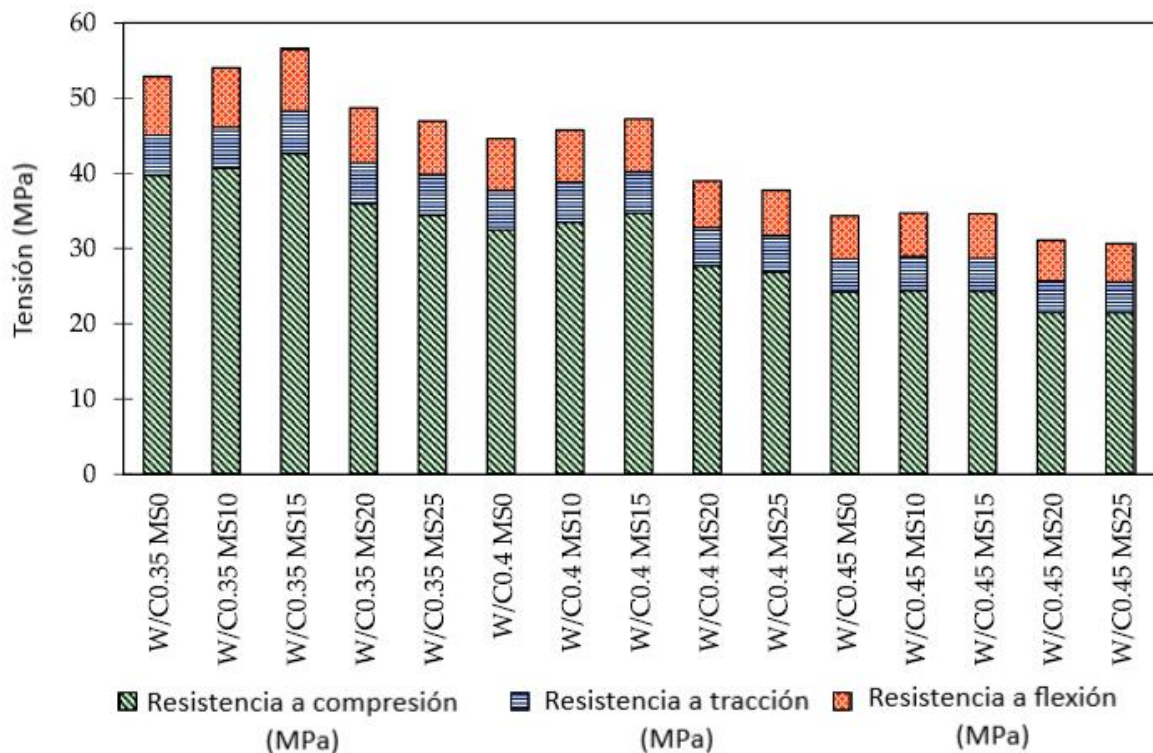


Figura 16 Resistencia mecánica para lodo de mármol (MS) al 0 10 15 20 y 25% y para relación agua cemento al 0,35 0,4 y 0,45% [24]

Tabla 15 Porcentajes usados en el estudio y otros datos [26]

Ratio de agua/aglutinante	Notas	Lodo de mármol % en masa	Lodo de mármol kg/m ³	Agregado grueso kg/m ³	Agregado fino kg/m ³	Mezcla l/m ³	Agua kg/m ³
0,35	Control mezcla	0	0	1278	689	0,9	148
0,35	-	10	42,2	1278	689	1,1	148
0,35	-	15	63,3	1278	689	1,2	148
0,35	-	20	84,4	1278	689	1,3	148
0,35	-	25	105,5	1278	689	1,4	148
0,4	Control mezcla	0	0	1257,2	707,2	0,63	158
0,4	-	10	39,4	1257,2	707,2	0,74	158
0,4	-	15	59,1	1257,2	707,2	0,84	158
0,4	-	20	78,8	1257,2	707,2	0,95	158
0,4	-	25	98,5	1257,2	707,2	1	158
0,45	Control mezcla	0	0	1183	858	0,35	158
0,45	-	10	35,1	1183	858	0,45	158
0,45	-	15	52,65	1183	858	0,52	158
0,45	-	20	70,2	1183	858	0,61	158
0,45	-	25	87,75	1183	858	0,7	158

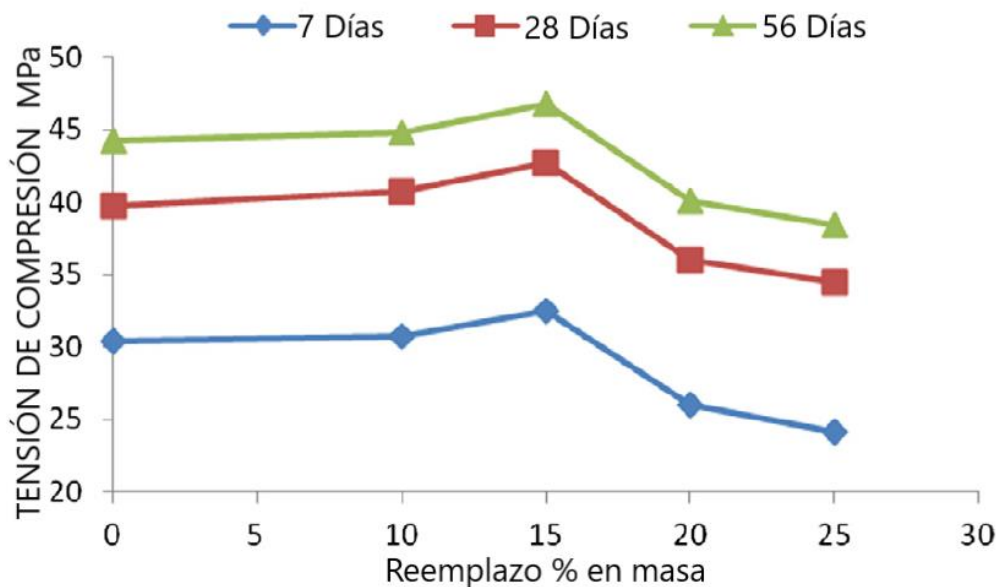


Figura 17 Variación de la resistencia a compresión con el tiempo según distintos porcentajes de sustitución [26]

En cuanto a las emisiones, la disminución de las mismas se deben a varias razones, una de ellas es debido a que el polvo es un sustitutivo del clínker y por lo tanto provoca una disminución de la producción y necesidad del mismo, otra es que la menor demanda de energía para obtener el cemento final y a parte el mármol es capaz de capturar CO₂ en el ambiente por medio de un proceso de

carbonatación producido durante la hidratación del hormigón almacenando el dióxido de carbono y reduciendo así las emisiones en su proceso de fabricación.

3.2.7 Uso de biocarbono

Esta técnica se basa en el uso del biocarbono, un producto de desperdicio derivado de materia orgánica capaz de capturar CO_2 a gran escala y según el estudio de Zhang, He, Wang, Yan, Ma, Zhu y Tsang [37], se trata de un material poroso que le otorga una gran superficie específica y por tanto de alta reactividad y es compatible con el cemento, al asfalto y al plástico. Este material se crea por la combustión de la materia orgánica mediante métodos termomecánicos en un ambiente con déficit de oxígeno, haciendo que el carbono de la biomasa empleada pase a formar este biocarbono. Este proceso termomecánico puede realizarse mediante pirólisis, gasificación o mediante carbonatación hidrotermal este proceso está descrito gráficamente en la figura 18. La pirólisis deberá realizarse con un aumento de temperatura de entre 5 a 10°C por minuto en una atmósfera con déficit de oxígeno y con una activación mecánica, es el proceso más simple de obtener el biocarbono, en este proceso es importante la temperatura de 650°C pues es aquella que permite la formación de biocarbono poroso con máximas propiedades, a partir de los 750°C, el biocarbono creado empieza a perder rendimiento y a descomponerse mientras que a temperaturas por encima de 800°C se produce la destrucción del mismo. En la gasificación la biomasa se trata a temperaturas mayores de 700°C en presencia de agentes gasificantes forma gases pirolíticos el CO , el H_2 o el CH_4 además de biocarbono aromático poroso, esto se sucede en 4 pasos los cuales son el secado (100-200°C), pirólisis (200-700°C), combustión (700-1500°C) y reducción (800-1000°C), en este caso los agentes gasificantes son los encargados de la formación de tanto del biocarbono como de los gases pirolíticos y se formará una mayor cantidad de uno o de otro según la temperatura a la que se trate la biomasa. Se formará una mayor cantidad de biocarbono a menores temperaturas y una mayor cantidad de gases a mayores temperaturas. Este biocarbono posee mayor porosidad que el pirolítico por lo que es más adecuado para ser añadido en el cemento. Sin embargo el contacto con álcalis (Na^+ , Mg^+ ...) durante su creación puede perjudicar su estructura pero a su vez esto mejora su reactividad. Por último la carbonatación hidrotermal, tiene la ventaja de poder actuar sobre biomasa húmeda y por lo tanto no tiene la necesidad de un proceso previo de secado, en este caso la biomasa se trata en un tanque de agua donde se aumenta la temperatura de 25 a 250°C permitiendo al agua convertirse en un medio más efectivo para acelerar las reacciones ácido-base necesarias para que se de este proceso, gracias a estas reacciones la biomasa se despolimeriza mediante hidrólisis, descarboxilización, desaminación y por otras reacciones orgánicas, degradando poco a poco la biomasa hasta formar hidrocarbón que será finalmente secado para obtener el biocarbono.

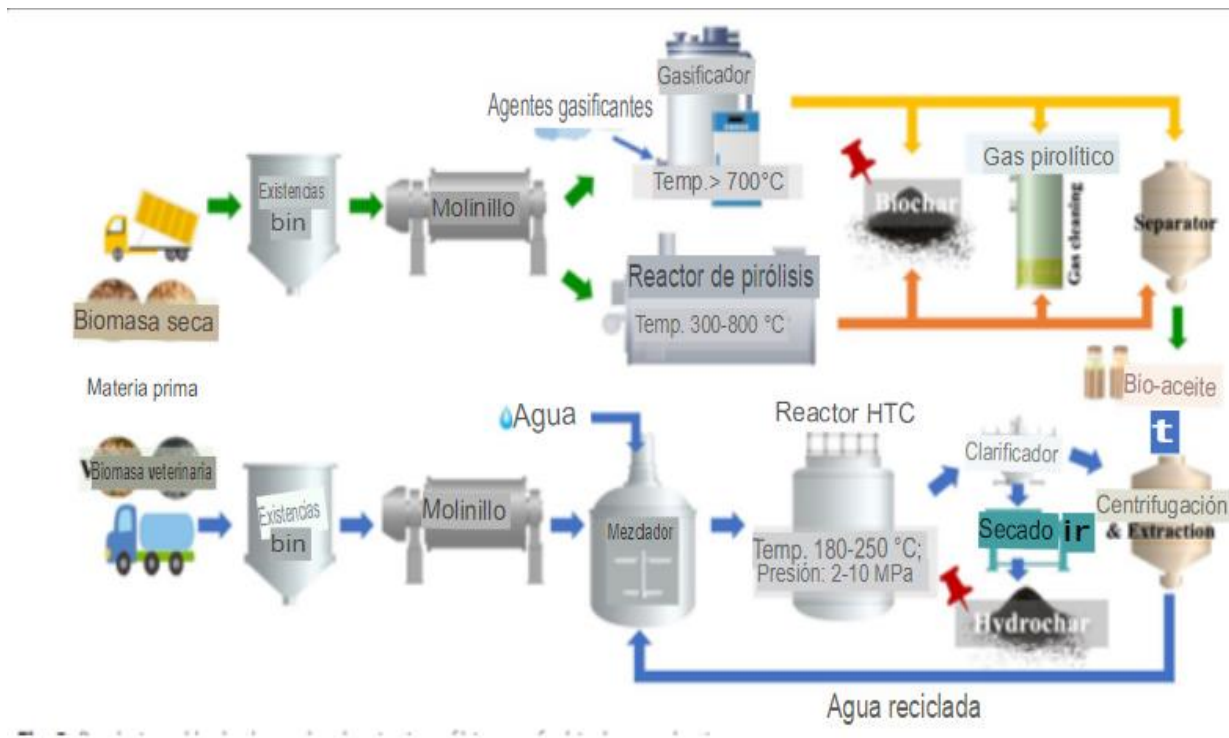


Figura 18 Formas de crear biocarbón

En cuanto a la resistencia mecánica de un cemento con este añadido, en el estudio de He, Xu, Sun, Chan, Lui, y Tsang, [38], mencionan que además de reducir las emisiones de dióxido de carbono, este agregado también es capaz de aumentar las propiedades mecánicas con respecto a un cemento Portland ordinario. Dado que es rico en SiO_2 y CaO , es capaz de formar fácilmente CSH (figura 19). En cuanto a su hidratación este añadido aumenta el calor de hidratación, pero debido a su alta superficie específica da al producto final muchos lugares de hidratación, facilitando la formación así del CSH, sin embargo deberá evitarse sobrepasar el 5% de sustitución dado que a partir del 6% el cemento disminuirá su capacidad de hidratación y con un 5% de biocarbón en masa, el cemento es capaz de aumentar hasta un 30% su capacidad de hidratación, con el coste de una mayor necesidad de agua para su hidratación. En cuanto a propiedades mecánicas, dependiendo del origen del biocarbón y de su tamaño, las modificaciones de su resistencia mecánica variarán de una forma u otra y a menor tamaño del polvo de biocarbón, como se puede apreciar en las figuras 20, 21 y 22. Esto se debe a la reactividad del polvo de biocarbón, a menor tamaño mayor reactividad y por tanto más facilidad de formación de productos de hidratación y a por la composición del biocarbón que dependiendo de su procedencia tendrá una composición u otra. Aquellas composiciones con más SiO_2 tendrán una mayor resistencia mecánica pues facilitarán la formación de CSH a la hora de realizar la hidratación.

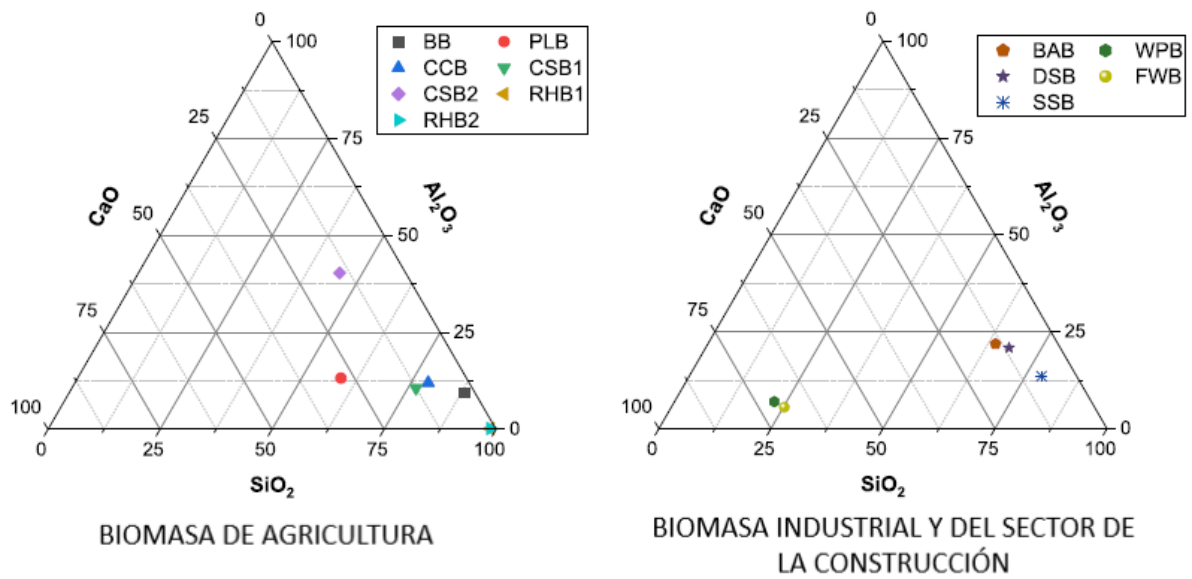


Figura 19 Composición en porcentaje de la biomasa empleada

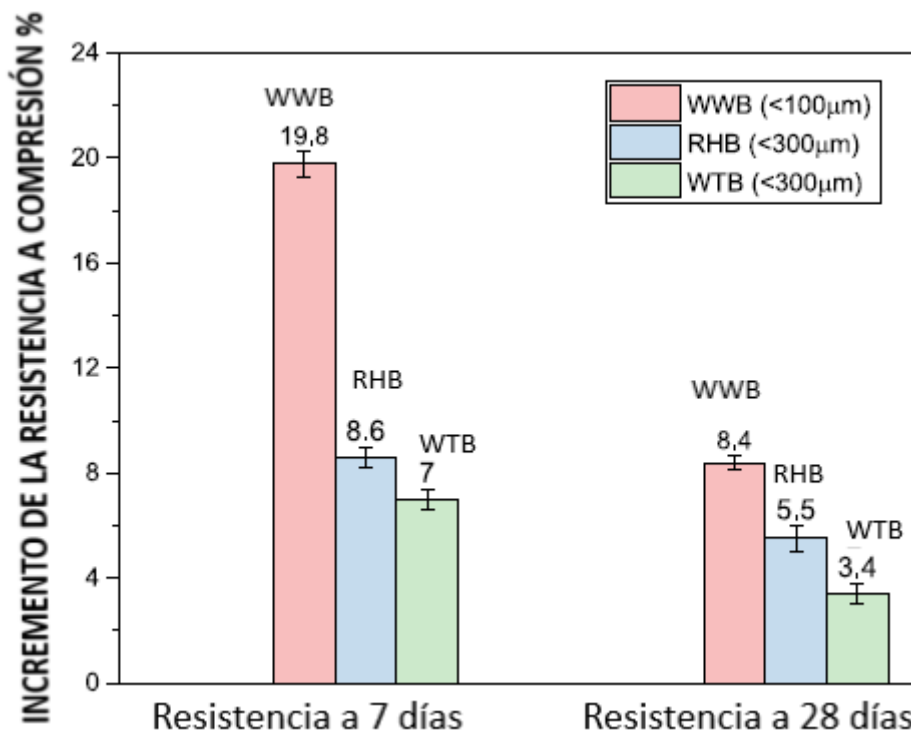


Figura 20 Resistencia a compresión, incremento en porcentaje según la procedencia del biocarbono.

Biocarbono proveniente de desecho forestal (WWB), Biocarbono proveniente de ceniza de arroz (RHB) y Biocarbono proveniente de arbusto (WTB).

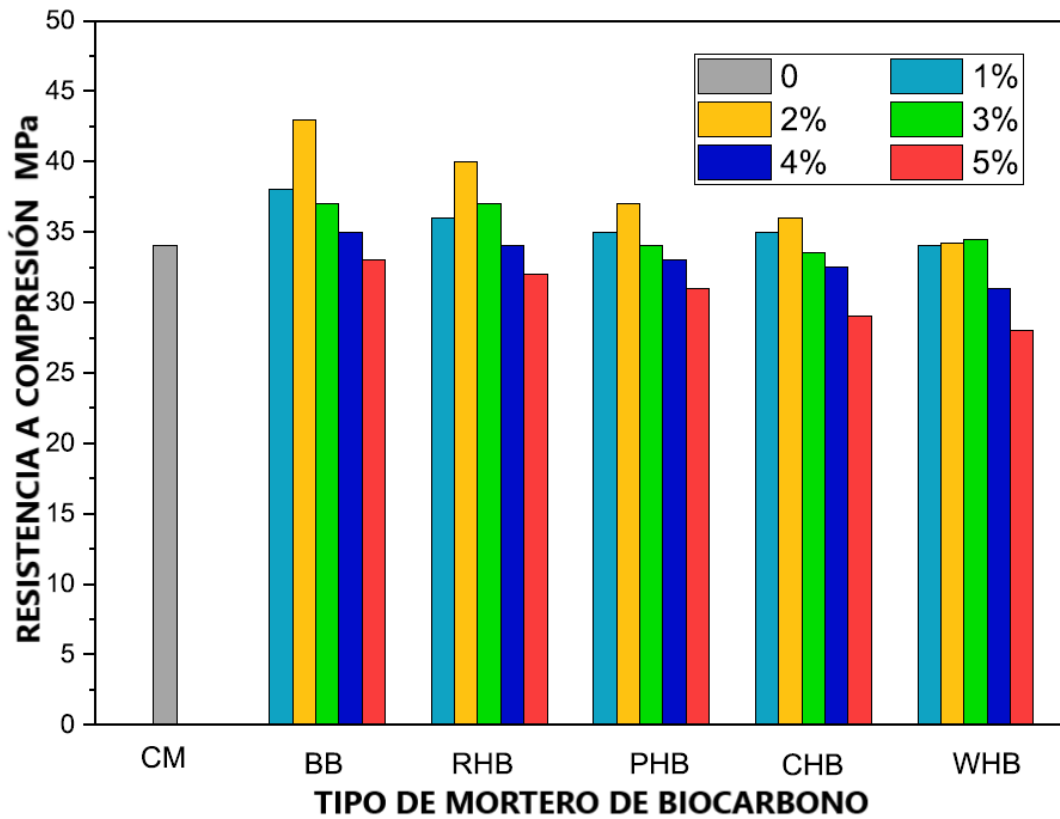


Figura 21 Resistencia a compresión de distintos tipos de biocarbón según su precursor

Biocarbón de bagazo (BB), biocarbón de ceniza de cacahuate (PHB), biocarbón de ceniza de coco (CHB) y biocarbón de ceniza de trigo (WHB)

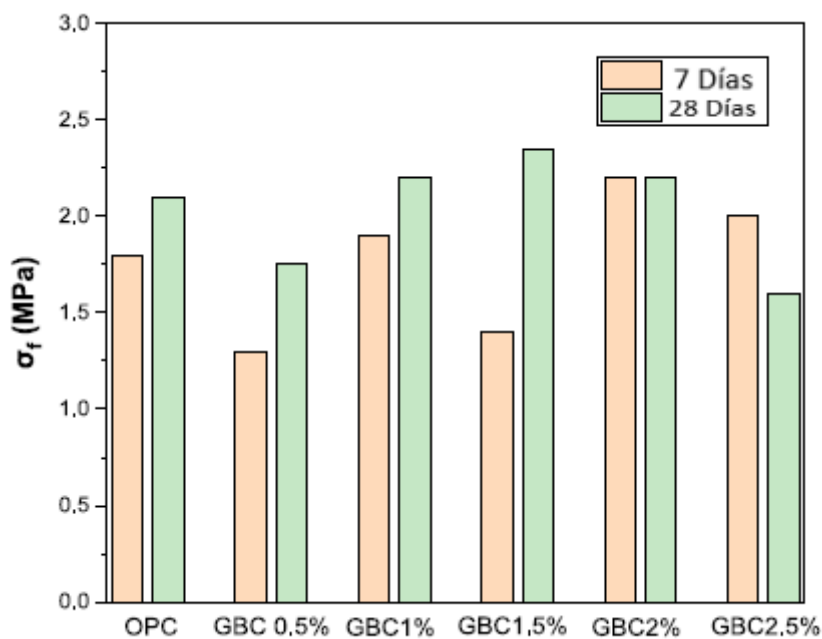


Figura 22 Resistencia a flexión según biocarbón usado en porcentaje en masa

En cuanto a sus capacidades de reducción de dióxido de carbono se puede decir que lo hace de dos formas distintas, la primera debido a la sustitución de parte del clínker y la segunda que es por captura

de CO₂ por parte del biocarbono, esto se produce durante la hidratación donde el CO₂ reacciona con el mortero para formar carbonato de calcio y se puede ver la cantidad de dióxido de carbono emitido en la tabla 16.

Tabla 16 Emisiones de dióxido de carbono según el porcentaje en masa de biocarbono

Control de diseño	Cemento kg	Ceniza volante kg	Biocarbono kg	CO ₂ eq kg
Control	1	0	0	1,002
BC1%	0,99	0	0,01	0,984
BC3%	0,97	0	0,03	0,95

Nota BC1 significa 1% de biocarbono para el reemplazo de cemento y BC3% se refiere a un 3% de biocarbono para el reemplazo de cemento

3.2.8 Uso de vidrio como añadido en cementos Portland

En este caso Santana-Carrillo, Burciaga-Díaz y Escalante-García, [28] estudian cómo se comporta el cemento al añadirle polvo de silicato de sodio ya sea comercial o proveniente de vidrio reciclado cuya composición química se puede observar en la tabla 17. Esto provoca una disminución de residuos de vidrio, una reducción de las emisiones de dióxido de carbono, un aumento de las propiedades mecánicas además de mejorar la resistencia al fuego los morteros y al hormigón y mejorar su estética siendo este último punto algo más secundario. Se trata de un material cementoso suplementario por lo que al igual que en casos anteriores permite la formación de CSH, esto se debe a su composición rica en SiO₂ debido a que el vidrio es una red de sílice amorfa con sus respectivos aditivos según el tipo de vidrio que se trate, en este caso se dispone de un 70% lo que facilitará la formación de compuestos debido a la reacción de la sílice y el hidróxido de calcio libre junto con el agua, además dado que hay también óxido de sodio, este puede formar compuestos cementantes adicionales en contacto con otros materiales debido a que es un activador alcalino.

Tabla 17 Composición química

	Componentes (% en masa)										
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LOI	H ₂ O	Ms
Caliza (LS)	0,39	0,02	56,01	0,13	0,24	0,06	0,33	0,05	42,92	-	-
Cemento Portland (PC)	20,23	0,19	60,63	4,28	0,49	3,28	1,23	3,5	4,83	-	-
Residuo de vidrio (WG)	70,3	13,58	12,76	1,52	0,52	0,39	0,35	0,17	-	-	-
Silicato de sodio comercial (CSS)	62,8	19,25	-	-	-	-	-	-	-	17,95	3,26

Tabla 18 Tipos de mortero usados ID mix cemento Portland(PC) caliza (LS) y silicato de sodio comercial(CSS) [28]

ID mezcla	Composición del aglutinante % en masa			Cantidad usada en morteros g					Flotabilidad mm
	PC %	CSS %	LS %	PC	CSS	LS	Agua	Arena	
10_2	10	2	88	100	20	880	460	2750	102
10_11	10	11	79	100	110	790	460	2750	102
10_20	10	20	70	100	200	700	460	2750	102
40_2	40	2	58	400	20	580	460	2750	102
40_11	40	11	49	400	110	490	460	2750	102
40_20	40	20	40	400	200	400	460	2750	102
70_2	70	2	28	700	20	280	460	2750	102
70_11	70	11	19	700	110	190	460	2750	102
70_20	70	20	10	700	200	100	460	2750	102
100_0	100	-	-	1000	-	-	460	2750	102

Tabla 19 Tipos de mortero usados ID mix: cemento Portland (PC) caliza (LS) residuo de vidrio (PSWG) y superplastificante (SP) [28]

ID mezcla	% composición en masa					Composición en peso en gramos							Flotabilidad mm
	PC %	CSS %	PSWG %	LS %	SP %	PC	CSS	PSWG	LS	SP	Agua	Arena	
40-11-PSWG	40	-	11	49	0,5	400	-	110	490	5	250	2750	127
40-11-CSS	40	11	-	49	0,5	400	110	-	490	5	250	2750	135

En las siguientes gráficas (figura 23) se observa la variación de la resistencia a compresión de distintos tipos de mortero (tabla 18) con respecto a un cemento Portland mezclado con caliza, como se ve el cemento con silicato de sodio es menor en resistencia que aquellos que sí que tienen el silicato. Sin embargo son menores al cemento Portland ordinario, además las mayores resistencias se alcanzan cuando hay un 70% de cemento Portland y entre un 2 a un 20% de silicato de sodio comercial, siendo la máxima resistencia aquel que posee un 11% por lo que no es lógico sobrepasar ese valor. Como el silicato de sodio comercial se trata de un aditivo, lo único que hace es mejorar al cemento Portland mezclado con caliza, que tiene unas menores propiedades con respecto al cemento Portland ordinario puesto que no posee el C₃S y del C₂S necesario como para obtener una resistencia similar, aunque el silicato de sodio sea capaz de formar productos de hidratación, no compensa la pérdida ocasionada por la adición de la caliza.

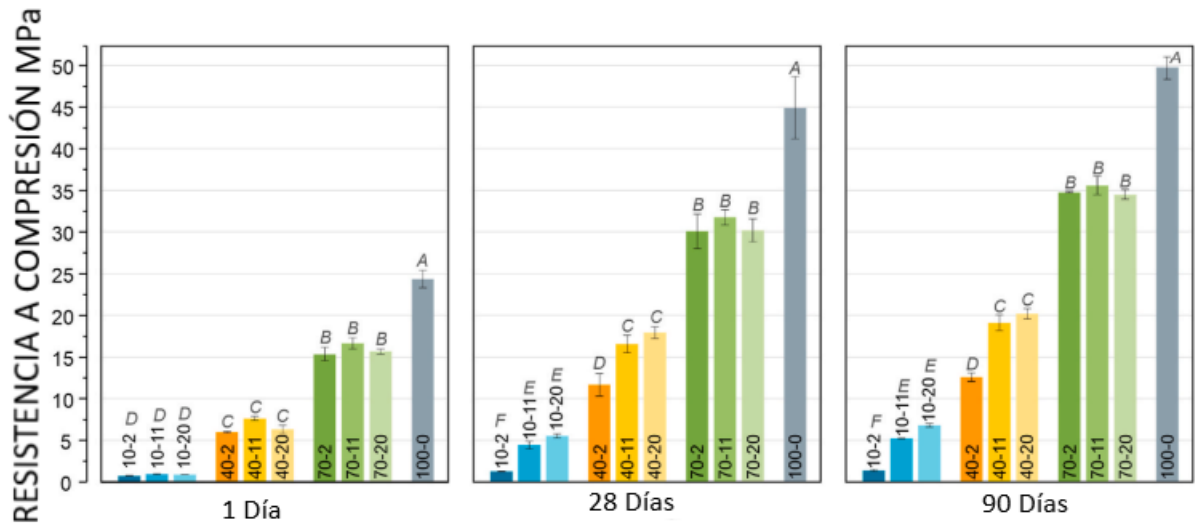


Figura 23 Resistencia a compresión del mortero con silicato de sodio [28]

En el caso del mortero con residuo de vidrio en este caso si se observa un comportamiento similar al del cemento Portland ordinario (composición en tabla 19), aunque en este caso se ha añadido un superplastificante (figura 24), este aditivo lo que ha provocado es que la reducción de la relación agua cemento necesaria para la fabricación del cemento desde un 0,46 a un 0,25 esta reducción permite una gran reducción de la porosidad haciendo que la resistencia mecánica aumente de igual forma (también se le ha añadido al silicato de sodio).

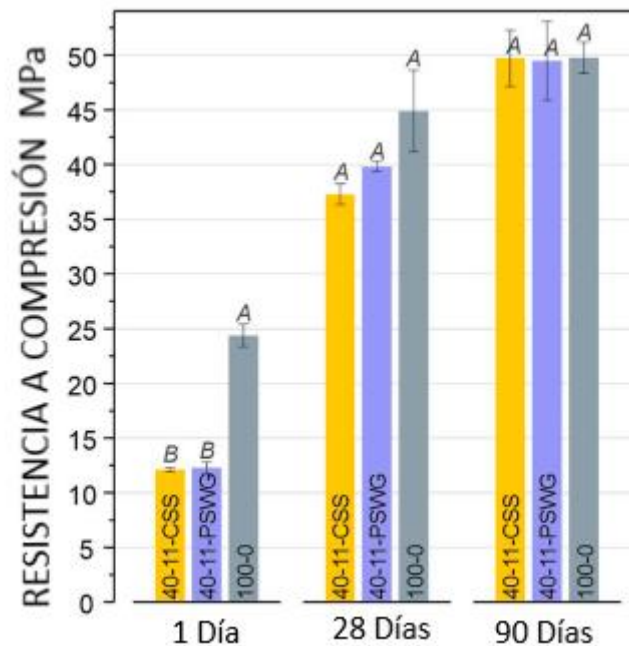


Figura 24 Resistencia a compresión según el tiempo con superplastificante

En cuanto a la reducción de emisiones se observa en la figura 25 que la mayor disminución viene dada por el mortero con residuo de vidrio con una reducción del 50% con respecto al cemento Portland ordinario, esto se debe a que, comparado con el silicato de sodio comercial, el vidrio necesita de un menor consumo de energía con respecto y de recursos reduciendo así su huella de carbono, además

de que la disminución de cemento Portland usado provoca también la reducción en las emisiones de dióxido de carbono.

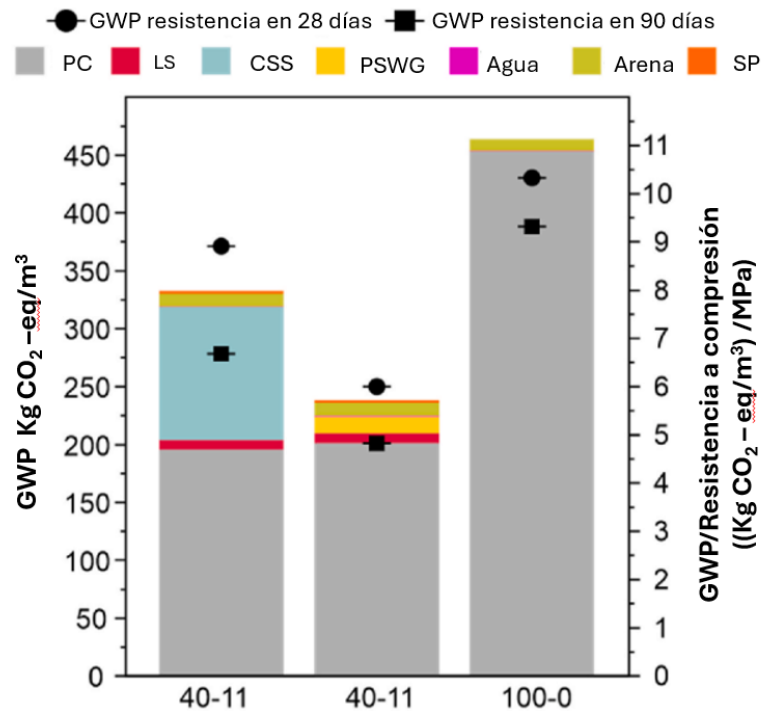


Figura 25 Emisiones del cemento con adición de vidrio.

3.3 Estrategias de disminución de las emisiones de CO₂ en el cemento Portland

Las diferentes estrategias para conseguir este objetivo irán desde la sustitución del combustible empleado para la obtención del clínker como el almacenamiento y captura del dióxido de carbono.

3.3.1 Uso de combustibles alternativos

En este caso lo que se plantea es la sustitución del uso de combustibles fósiles como el carbón, el coque de petróleo o el gas natural por alternativas que causen una menor emisión de dióxido de carbono a la hora de ser usados en el horno al crear el clínker, entre esos combustibles podemos encontrar:

- Biomasa

La biomasa en este caso podrá ser tanto de origen agrícola como de origen no agrícola en el estudio de Murray, y Price [29], muestra el impacto ambiental del uso de distintos tipos de combustibles como se ve en las tablas 20 y 21 y de las figuras 26 y 27. En ellas, se observa que gracias al reemplazo parcial de combustibles tradicionales por biomasa, se da una disminución de la cantidad de CO₂ emitido a la atmosfera. Dado a que durante el crecimiento de la biomasa esta capta dióxido de carbono, se puede catalogar como un combustible neutro pues no produce un incremento de dióxido de carbono emitido, por lo que la reducción de las emisiones en este caso viene dada por la cantidad de emisiones equivalente al carbón (u otro combustible) empleado.

Tabla 20 datos de emisiones totales netas, sustitución, poder calorífico, contenido en agua y factor de emisiones de carbono

Combustible	Radio de sustitución de combustible % en masa	Contenido en energía (LHV) (GJ/ton seca)	Contenido en agua % en masa	Factor de emisiones de carbono Ton C/Ton	ΔCO_2 Ton/ton reemplazo de carbón
Ceniza arroz	35	13,2-16,2	10	0,35	-2,5
Paja de trigo	20	15,8-18,2	7,3-14,2	0,42	-2,5
Rastrojos de maíz	20	9,2-14,7	9,4-35	0,28	-2,5
Hoja de caña de azúcar	20	15,8	<15	0,34	-2,5
Bagazo de caña de azúcar	20	14,4-19,4	10-15	0,39	-2,5
Tallos de colza	20	16,4	12,6	0,39	-2,5
Cáscara de avellana	20	17,5	9,2	0,48	-2,5
Cáscara nuez de palma	20	11,9	-	0,36	-2,5

Tabla 21 Datos de emisiones totales netas, sustitución, poder calorífico, contenido en agua y factor de emisiones de carbono

Combustible	Radio de sustitución de combustible % en masa	Contenido en energía (LHV) (GJ/ton seca)	Contenido en agua % en masa	Factor de emisiones de carbono Ton C/Ton	ΔCO_2 Ton/Ton reemplazo de carbón
Lodo de depuradora	20	10,5-29	75	0,08	-2,5
Lodo de depuradora seco	20	10,5-29	20	0,24	-2,5
Lodo de papel	20	8,5	70	0,2	-2,5
Papel	20	12,5-22	-	0,42	-2,5
Serrín	20	16,5	20	0,38	-2,5
Residuo de madera	20	15,5-17,4	33,3	0,34	-2,5
Residuos animales	20	16-17-19	15	0,29	-2,5

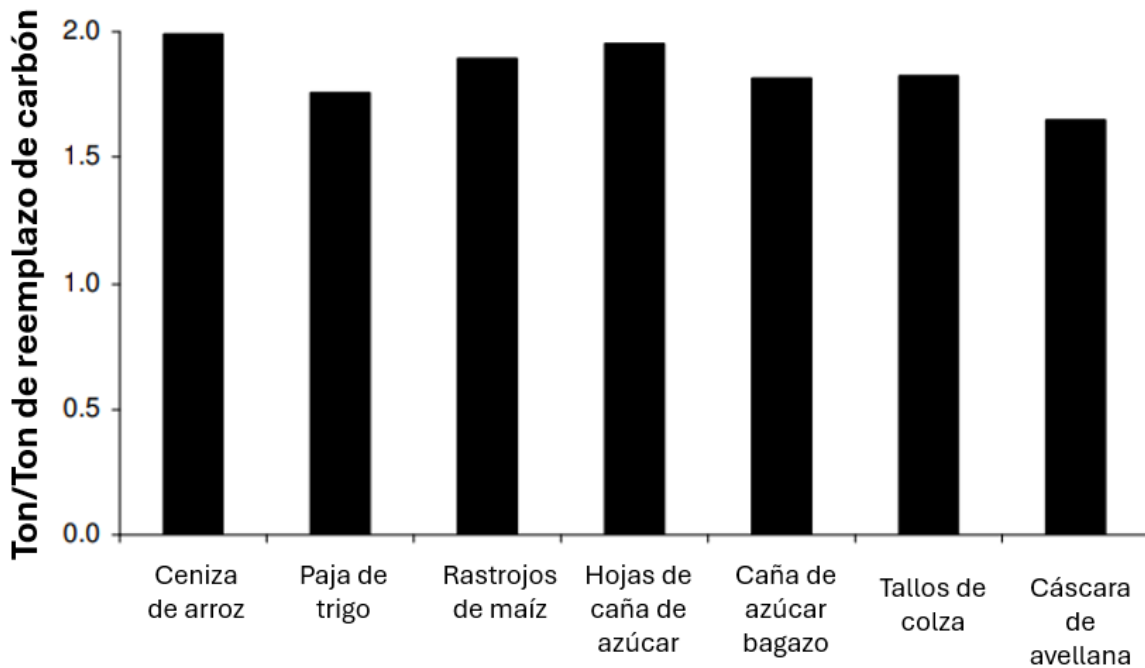


Figura 26 Datos de la cantidad de toneladas de biomasa a usar respecto a una tonelada de carbón

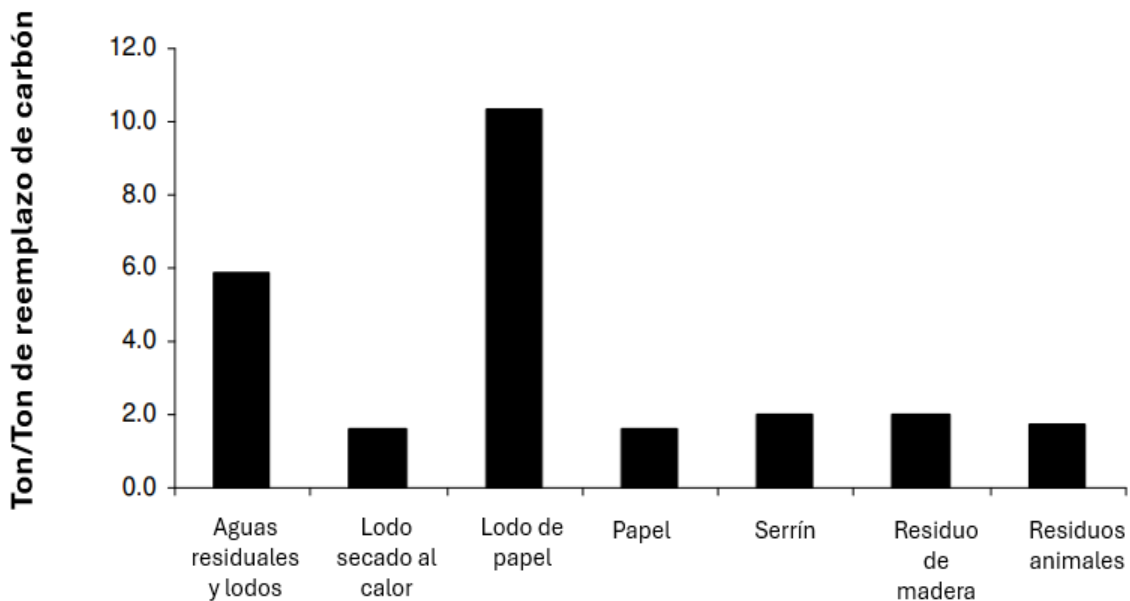


Figura 27 Datos de la cantidad de toneladas de biomasa a usar respecto a una tonelada de carbón

- Derivados del petróleo

En el mismo documento [29] se considera también combustibles derivados del petróleo debido a sus altos poderes caloríficos. Este tipo de materiales son buenos candidatos como combustibles alternativos con la excepción del policloruro de vinilo (PVC), que debido a su contenido en cloro puede perjudicar la calidad del clínker de cemento. En todos los derivados de petróleo usados, se puede ver que se produce una disminución en la huella de carbono exceptuando el caso del coque de petróleo, que aumenta las emisiones de CO₂. Sin embargo en el estudio solo muestra ratios de sustitución en el

uso de neumáticos y de coque de petróleo como se ve en la figura 28. Además, como se observa en la tabla 22. Se pueden observar resultados similares en el estudio realizado por Rahman, Rasul, Khan y Sharma [31].

Tabla 22 Datos de emisiones totales netas, sustitución, poder calorífico, contenido en agua y factor de emisiones de carbono

Combustible	Radio de sustitución de combustible %	Contenido en energía (LHV) (GJ/ton seca)	Factor de emisiones de carbono Ton C/Ton	ΔCO_2 Ton/ton reemplazo de carbón
Neumático	<20	28-37	0,56	-0,8
Polietileno	No disponible	46	0,7	-1
Polipropileno	No disponible	46	0,7	-1
Poliestireno	No disponible	41	0,7	-0,9
Desperdicio de aceite	No disponible	21,6	0,44	-0,5
Coque de petróleo	Sobre 100	19-34	0,78	0,2

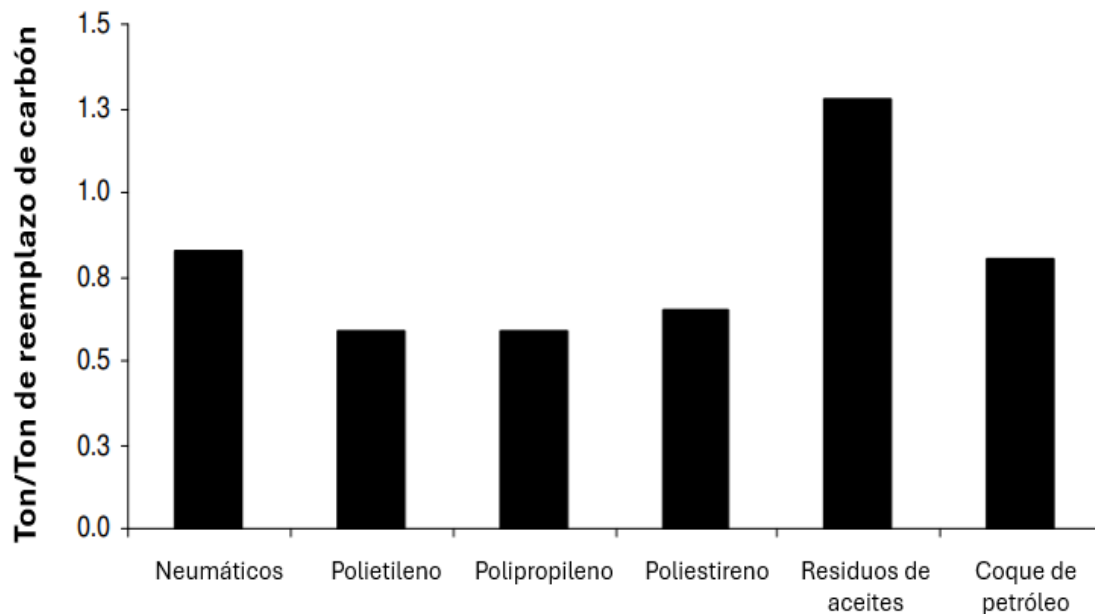


Figura 28 Datos de la cantidad de toneladas de derivados del petróleo a usar respecto a una tonelada de carbón

3.3.2 Calcinador solar

Esta tecnología se basa en el uso de la energía termosolar para sustituir a los combustibles fósiles usados para la generación de calor en las plantas de cemento. Este estudio está realizado por Moumin,

Ryssel, Zhao, Markewitz, Sattler, Robinius y Stolten [30] y aunque no elimina las emisiones generadas por la descomposición del CaCO_3 si elimina las generadas por la quema de combustible. Se podrán distinguir dos formas para realizar esta nueva forma de producción de cemento (figura 29).

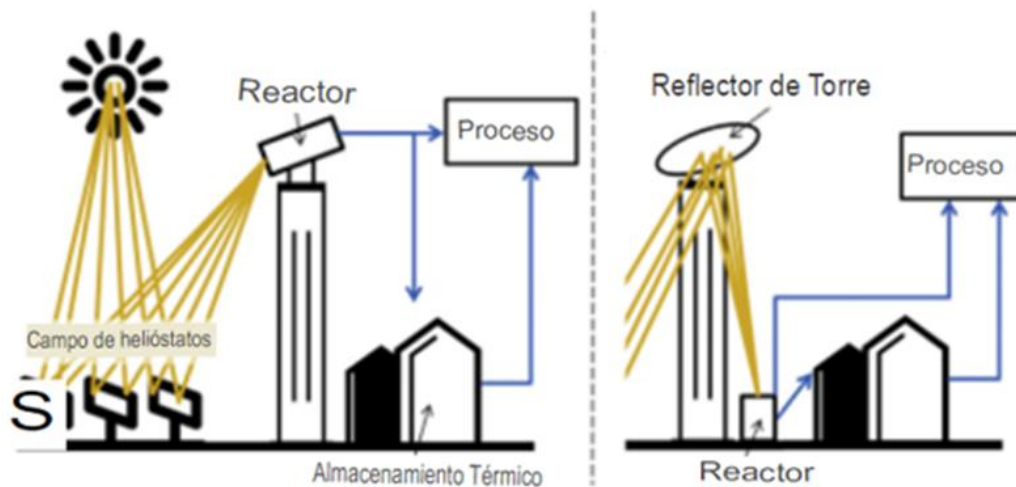


Figura 29 Tipos de calcinador solar.

La primera forma es situando el reactor solar en lo alto de una torre, esto provoca una menor pérdida óptica y por lo tanto podrá aprovechar de una mejor forma los rayos solares reflejados por los espejos.

La segunda forma sitúa al reactor en el suelo mientras que los espejos dirigen los rayos solares a un reflector parabólico en lo alto de una torre que a su vez redirige todos esos rayos al reactor, esta forma es mucho más sencilla de aplicar pues la alimentación del reactor es mucho más sencilla, pero tiene el inconveniente de que posee muchas pérdidas de calor. Además, dado que los rayos solares solo pueden ser aprovechados durante el día, este método incluye la adición de un almacenador de calor que puede ser usado cuando las condiciones de luz no sean favorables o incluso en la noche. Esto se puede realizar gracias al almacenamiento del excedente de calor producido por los espejos. Estos tanques de almacenamiento estarán compuestos de dos recipientes (que contienen una mezcla de sales como nitrato de potasio y nitrato de sodio), intercambiadores de calor, tuberías y bombas de calor.

En las pruebas realizadas en el DLR Institute of Solar Research [30] se consiguieron los resultados de la tabla 23. Además, en la bibliografía del documento se menciona que el tamaño del polvo del cemento varía en torno a los 100 micrómetros.

Tabla 23 Parámetros en el calcinador solar.

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo de alimentación de polvo analizado	7,7	kg/h
Temperatura del polvo en la entrada	20	°C
Temperatura del polvo en la salida	1000	°C
Radio calcinación/conversión	95	%
Entrada de potencia	14,2	kWth
Eficiencia térmica	37	%
Tiempo de arrancado	2	h

Tabla 24 Irradiación normal incidente (DNI), cantidad de luz que incide a la hora.

Base de datos	Actual DNI kWh/(m ² *a)
P95 caso base	2012
P50 caso optimista	2207

En cuanto al funcionamiento de la fábrica, esta lo hará de forma híbrida por lo que usará tanto carbón como la energía térmica y dado que la luz solar tarda en torno a las 2 horas en alcanzar su temperatura máxima, si el sistema necesita de una mayor temperatura, el calcinador puede aceptar más carbón para suplir el déficit de calor momentáneamente y se muestra cómo funciona de forma esquemática en la figura 30. El caso estudiado en este documento es el de una fábrica localizada en el sur de España donde se pueden alcanzar hasta 130 MW de potencia de incidencia del Sol desde una única torre, si la capacidad de generación de energía es igual a la de almacenamiento, la central se denominará multiplicador solar 1 o SM1 y todo lo que produzca se almacenará en el reactor, si por el contrario genera más energía de la que puede almacenar en el reactor su multiplicador solar o SM será mayor que 1 y entonces ese calor tendrá que ser guardado, si se da este caso y el sobrante de calor no puede ser guardado, se puede generar un sobrecalentamiento del reactor y provocar daños en el sistema, se pueden añadir sistemas de almacenamiento térmico, aumentar la capacidad del reactor o reducir la radiación incidente que refleja los espejos (esquema en la figura 31).

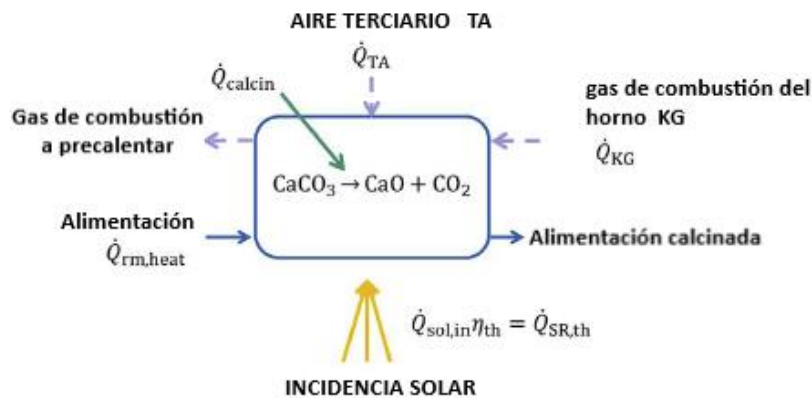


Figura 30 Flujo de un calcinador solar.

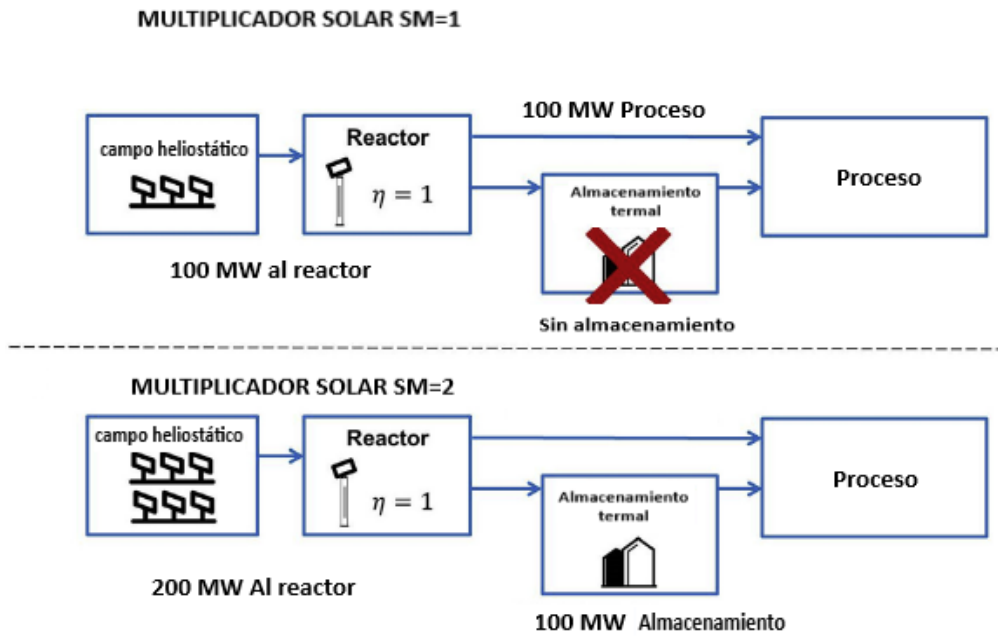


Figura 31 SM de calcinador solar.

En cuanto a la eficiencia de este método, se distinguirá 6 posibles escenarios, un escenario normal en el que haya una irradiación normal incidente o DNI P95 y una eficiencia del reactor del 50%, un escenario exactamente igual que el anterior, pero con una eficiencia del reactor del 65%, los equivalentes a los dos casos anteriores, pero con DNI P50 y los dos últimos pues uno con un SM de 3 y el último con un SM de 3,5 (ver DNI P95 Y DNI P50 en la tabla 24) [30].

Caso 1 o base: DNI P95 eficiencia 50%: Se usó un SM de 2,5. En este caso las emisiones de CO₂ se redujeron en un 13,8% y los costos del clínker fueron de 75 €/ton.

Caso 2 DNI P95 eficiencia 65%: En este caso hubo una reducción del 13,8% de las emisiones y del coste a 72 €/ton debido a la mayor eficiencia del reactor.

Caso 3 DNI P50 eficiencia 50%: Debido a la mayor solarización que el caso 2, las reducciones de dióxido de carbono bajan al 14,5% y los costes pasan a 74 €/ton.

Caso 4 DNI P50 eficiencia 65%: La mayor solarización causa también una mayor disminución de las emisiones de dióxido de carbono, pero su precio sigue siendo similar.

Caso 5 MS3: En este caso también disminuye la huella de carbono y el precio de clínker se mantiene

Caso 6 MS 3,5: En este caso también disminuye la huella de carbono y el precio de clínker se mantiene

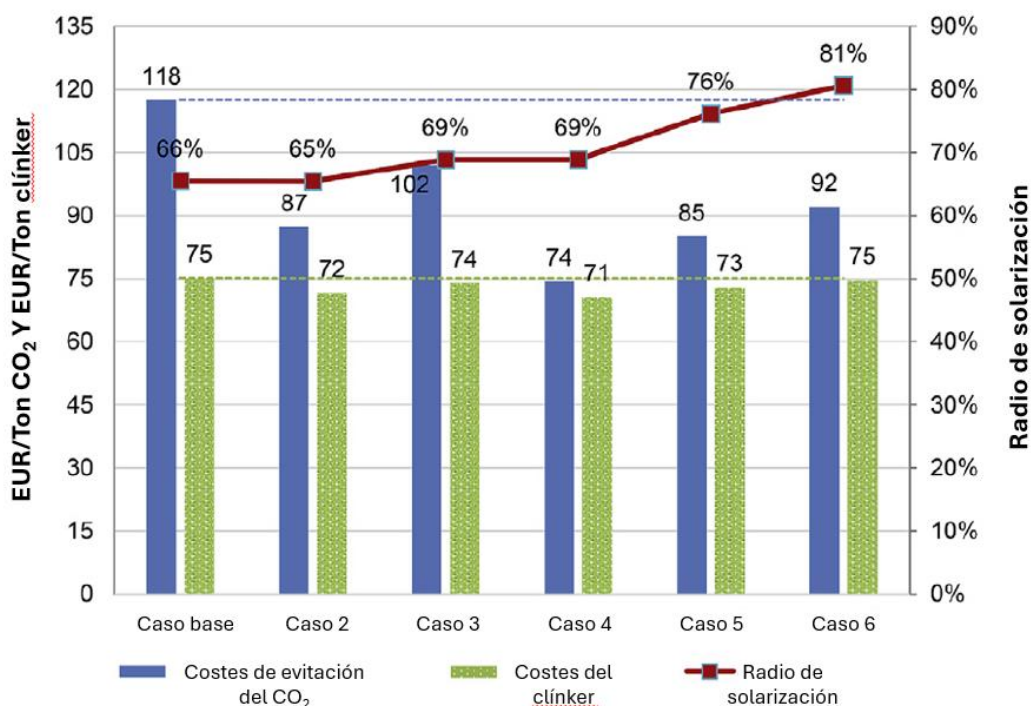


Figura 32 Costes y emisiones del calcinador solar.

La reducción de dióxido de carbono será más efectiva según donde sea empleada. En lugares como España donde hay gran cantidad de DNI se puede llegar a eficiencias de hasta el 66% como se puede observar en la figura 32. El estudio muestra cómo será la reducción de emisiones (En el sur de España) en tres escenarios distintos, uno normal siguiendo la tendencia actual, uno pesimista en la que se produce un estancamiento de esta tecnología y uno optimista cuyos datos aparecen en la tabla 25. Partiendo de que se emiten 829 kgCO₂/ton. Para el 2050 el escenario normal plantea un crecimiento del uso de esta tecnología de hasta el 30%, en el escenario pesimista de hasta un 15% y en el escenario optimista de hasta un 50%. En todas se ve que se produce una disminución de las emisiones llegando hasta a poder reducir un 7% de ellas.

Tabla 25 Reducción de emisiones a lo largo del tiempo.

Año	Escenario base			Escenario pesimista			Escenario optimista		
	Plantas solares	Emisiones específicas		Plantas solares	Emisiones específicas		plantas solares	Emisiones específicas	
		kg (CO ₂)/ton (clínker)	%		kg (CO ₂)/ton (clínker)	%		kg (CO ₂)/ton (clínker)	%
2016	0%	829	0	0%	829	0	0%	829	0
2020	0%	829	0	0%	829	0	0%	829	0
2030	6%	822	-1	3%	826	-1	10%	818	-1
2040	18%	808	-2	9%	819	-2	30%	795	-4
2050	30%	795	-4	15%	812	-4	50%	772	-7

3.4 Tecnologías de almacenamiento y captación de dióxido de carbono

En este caso se buscará la captura y el almacenamiento del dióxido de carbono emitido a la atmósfera generado en el horno y se describirán distintos métodos para su consecución. Tiene la ventaja de que en este caso no hay que sustituir el polvo de partida para la creación del cemento Portland ni tampoco sustituir el combustibles para calentar el horno.

3.4.1 Lavado con aminas

Los estudios de Hills, Leeson, Florin y Fennell [32] y de Cormos [33] definen esta técnica como el uso de disoluciones de aminas para capturar el dióxido de carbono generado en el horno por medio del uso de aminas como la monoetanolamina (MEA), la dietanolamina (DEA) o la metildietanolamina (MDEA) que reaccionan con el dióxido de carbono formando así una sal que puede ser posteriormente descompuesta térmicamente liberando el dióxido de carbono.

3.4.2 Ciclo de calcio

Esta tecnología se basa en el uso de CaO como sorbente situado en un carbonatador separado del horno y que reacciona con el dióxido de carbono también aparecen en los estudios de Hills, Leeson, Florin y Fennell [32] y de Cormos [33]. En este caso la reacción da como resultado carbonato cálcico que posteriormente puede descomponerse de nuevo en óxido de calcio y dióxido de carbono por medio de descomposición térmica en un calcinador. Este proceso opera a temperaturas de entorno a unos 600° C y el calcinador se encuentra en torno a los 800 o 950° permitiendo así recuperación del calor e incluso generación de energía.

3.4.3 Óxido-combustión

En este caso Cormos [33] explica que para la eliminación del CO₂ se necesita de una atmósfera con un gran contenido en oxígeno que favorezca la formación de CO₂ para que posteriormente, la separación del CO₂ se produzca a través de unas membranas poliméricas que solo dejarán pasar al dióxido de carbono para que tras ser capturado por medio de aminas a través de absorción química o adsorción para posteriormente que estas aminas sean absorbidas por carbón activo eliminando así el CO₂.

Un enfoque distinto a los anteriormente mencionados es la reducción del CO₂, propuesto por el estudio de Qin, Zhu, Qin, Duan, Asamoah y Han [34], en este se propone la reducción de CO₂ generado en la producción del cemento gracias a la gasificación de los residuos sólidos urbanos [34, además de sustituir el carbón empleado en fábricas de cemento por gas de síntesis derivado de los residuos urbanos. Este proceso consiste en el secado de los residuos orgánicos disminuyendo su humedad a un 20% en peso. Una vez secados estos residuos son sometidos a un proceso de pirólisis a baja temperatura usando el CO₂ generado en el horno Clinker, para a continuación gasificar esos residuos empleando el CO₂ del horno Clinker (tabla 26). El CO₂ actúa como agente gasificante y reacciona en condiciones autotérmicas para formar. A parte de la generación de CO, también se da la generación de H₂. La combinación de CO y H₂ da lugar al gas de síntesis. Gracias a la sustitución de carbón por gas de síntesis, la eliminación neta de dióxido de carbono es de 172,11 kg CO₂/ton cemento.

Tabla 26 Datos del precalentador [34]

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura	°C	340
Flujo	Nm ³ /h	345000
O ₂	vol %	6,58
CO ₂	vol %	24,36
N ₂	vol %	69,05

3.5 Uso de cemento y hormigón reciclado en la fabricación de cemento Portland

El estudio de Li, Liu, Huang y Peng [35] estudian el empleo de cemento reciclado en la fabricación de cemento Portland. Esto puede suponer una disminución de entre el 20% y el 50% de las emisiones totales de CO₂ en comparación a la fabricación de cemento Portland sin uso de materiales reciclados. En cuanto a los valores de uso de cemento Portland reciclado, se podrá usar hasta un 30% de cemento reciclado sin que este afecte de manera negativa a las propiedades mecánicas finales. La reducción de CO₂ se basa en la reacción del CaO libre con el CO₂ para formar CaCO₃. Esta forma de eliminación de dióxido de carbono es similar a la tecnología de ciclo de calcio descrita en el anterior apartado. En cuanto a las propiedades mecánicas finales, se puede llegar a una mejora resistencia a la compresión y a la flexión en comparación con el uso de cemento Portland. Además, en el caso del hormigón, hay una mejora en la adherencia del cemento con el refuerzo del hormigón armado. Sin embargo, esta mejora de propiedades vendrá dada de la calidad del cemento reciclado empleado, por lo que es recomendable el empleo de estudios específicos y de los ensayos de laboratorio pertinentes para garantizar por lo menos la conservación de las propiedades mecánicas que tendría un cemento Portland ordinario virgen.

Por otro lado según Tokareva, Kaassamani y Waldmann [36], proponen el uso los desperdicios de hormigón generados en las obras de construcción para utilizarlos como material suplementario cementoso. En este estudio los autores evalúan la actividad hidráulica y puzolánica de estos desperdicios, además de evaluar las propiedades mecánicas del nuevo cemento formado y su microestructura. Para ello se ensayará este cemento cuya composición óptima es del 20% peso, el cual es el porcentaje máximo para obtener un incremento máximo de propiedades mecánicas sin perjudicar la trabajabilidad cemento. Este método comienza con la trituración del hormigón y la separación de las partes perjudiciales y lavando el polvo generado para obtener los componentes puzolánicos anteriormente mencionados. Este método variará según las características del desperdicio. A continuación, el polvo se somete a un tratamiento térmico donde al llegar a los 500°C, se producen cambios en el residuo alterando su composición debido a que se produce una deshidratación de sus productos hidratados, durante esta deshidratación, la pérdida de humedad aumenta la homogeneización de la mezcla haciendo así que el polvo final sea menos poroso además de provocar la formación polimorfos de C₂S como el C₂S α, el cual tiene un carácter muy reactivo y provoca una mejora en la ganancia inicial de resistencia mecánica y que además tiene carácter puzolánico. Por último, solo queda mezclar este polvo reciclado con el cemento Portland y añadirle el agua para obtener este nuevo cemento.

Como se ve en la figura 33, los cementos con polvo de hormigón deshidratado (WM) poseen un aumento de propiedades mecánicas al igual que los otros cementos que usan cemento suplementario (CS) o escorias de alto horno (MS), con respecto se aumenta la temperatura. Esto se observa sobre todo a 500°C donde se observan los mejores valores de resistencia a compresión. Además, superan el mínimo de resistencia mecánica dictada por la UE de 325 MPa, además de superar los 42,5 MPa.

En cuanto a la disminución de dióxido de carbono debido a que se da una sustitución del 20% del clínker por polvo de hormigón, se produce una disminución de producción necesaria de clínker por lo que a su vez se consigue una reducción de las emisiones producidas en la fabricación del cemento como se puede observar en la tabla 27.

Tabla 27 Reducción de emisiones por polvo de hormigón [36]

residuos	condiciones de secado	calcinación	consumo energético	consumo energético (respecto referencia)	emisiones CO ₂	emisiones CO ₂ (respecto referencia)
		temperatura °C	kJ/kg (aglutinante)	%	kg(CO ₂)/kg(aglutinante)	%
MS	Ambiente	-	3224	-22	0,624	-20
		400	3251	-17,6	0,631	-19,1
		500	3272	-17	0,632	-19
	105°C	-	3614	-8,3	0,656	-15,9
		400	3714	-5,8	0,663	-15
		500	3735	-5,3	0,664	-14,9
WM	Ambiente	-	3224	-20	0,624	-20
		400	3251	-17,6	0,631	-19,1
		500	3272	-17	0,632	-19
	105°C	-	4081	3,5	0,688	-11,8
		400	4177	5,9	0,695	-10,9
		500	4198	6,4	0,696	-10,7
cemento portland ordinario	-	-	3944	-	0,78	-

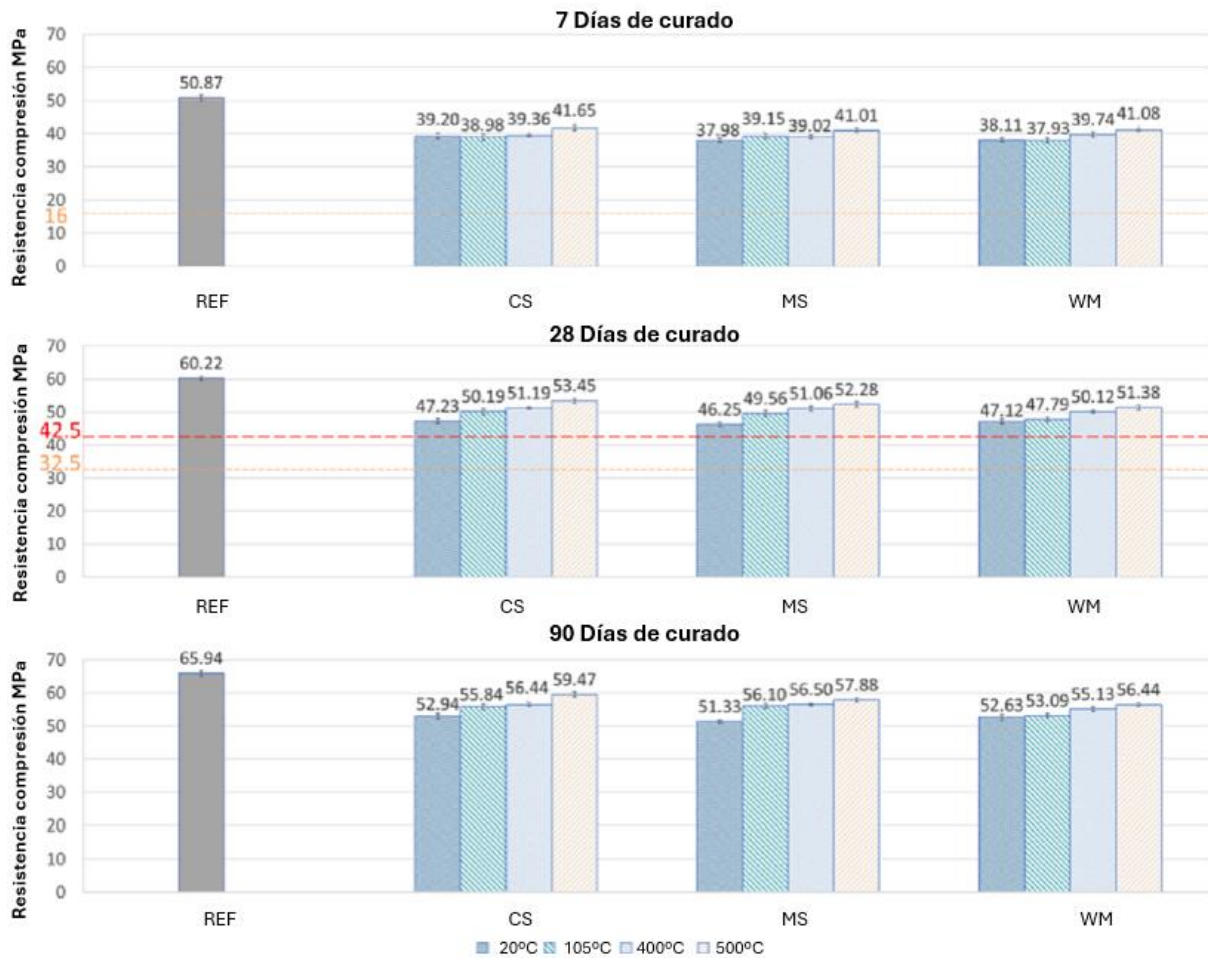


Figura 33 Resistencias mecánicas de hormigones [36]

En cuanto a su microestructura, el estudio ha observado mediante microscopía óptica de barrido (SEM) la presencia de una distribución de partículas más uniforme debido a la formación del CaOH formado por la reacción puzolánica de CaO libre con los materiales puzolánicos, en este caso el polvo de demolición, una porosidad menor además de fases cristalinas como el cuarzo, la calcita, la dolomita, la muscovita, el feldespato, la clorita y el yeso.

4. PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGÍA

La parte experimental de este trabajo constará de dos partes, un análisis del ciclo de vida del cemento (ACV) Portland y de una selección de cementos con el cemento Portland ordinario a partir de los datos obtenidos en el análisis del ciclo de vida.

4.1 Análisis de ciclo de vida

Según la norma ISO 14044:2006/A2 [39] un ACV se trata de un proceso de análisis sobre el impacto causado por un producto durante toda su vida útil. Es una herramienta eficaz usada por las empresas para realizar una correcta gestión medioambiental de su producción. En este caso, este ACV tendrá como objetivo la determinación del impacto ambiental debido a las emisiones de CO₂ producidas en la creación de 1 tonelada de cemento sin tener en cuenta los impactos producidos tras su fabricación. Para ello se utilizarán los datos obtenidos de una fábrica de Cataluña que fueron usados en una tesis doctoral hecha para la Universidad Politécnica de Cataluña en 2001 [40], esta tesis se basó en los inventarios del CEMBUREAU del 1999, el VDZ del 2000, y el EPER del 2000 abordando tanto las entradas como las salidas de la fabricación. Las entradas del proceso productivo se compondrán de las materias primas necesarias para la creación del cemento Portland (caliza, arcilla, arena, hierro y yeso) además del consumo energético ya sea eléctrico o por combustible fósil empleado para la producción. Las salidas, constarán del cemento producido además de las emisiones de gases generadas a lo largo del proceso de fabricación. En este caso se considerará tan solo las emisiones de dióxido de carbono.

Los datos obtenidos de la tesis doctoral se representarán en tablas donde se mostrará información sobre la masa de las materias primas, el consumo energético empleado en la extracción de las materias primas (ya sea por diésel o por consumo eléctrico) y del consumo energético generado por la quema del carbón en el horno. Dado que en los datos de la tesis se dan valores máximos y mínimos dando así un rango de valores en el consumo de materias primas y energía y de sus emisiones, se procederá a añadir los valores medios entre los máximos y los mínimos.

Dado que la finalidad de este apartado es el cálculo del dióxido de carbono total emitido, se dividirán las emisiones de CO₂ entre las emisiones de CO₂ durante el proceso de extracción y preparación de las materias primas y las emisiones emitidas por el horno, de estas 2 divisiones la tesis da en formato de tabla las emisiones generadas durante cada fase del proceso extractivo y de preparación de materias primas. Esta información al igual que en las tablas anteriores viene un rangos de valor máximo y valor mínimo por lo que se calculará el valor medio de las emisiones de cada fase y con esos valores medios se sumarán entre sí para determinar las emisiones totales de la extracción y preparación de las materias primas, en el caso de las emisiones del horno el documento determina que se emiten 898,766 kg CO₂/kg [40] cemento pero no determina el CO₂ emitido por la quema de combustible y el CO₂ que proviene de la descarbonatación del CaCO₃, para hacer dicha distinción, por medio de cálculos estequiométricos, se realizará la ecuación 1, calculado el CO₂ generado por la descarbonatación, para el cálculo de las emisiones generadas por la quema de combustible en el horno bastaría con la resta del valor dado por la tesis, es decir 898,766 kg CO₂/kg cemento con las emisiones generadas por la descarbonatación.

$$\frac{\text{ton CaCO}_3}{\text{ton cemento}} * \frac{\text{mol CaCO}_3}{\text{g CaCO}_3} * \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol CaCO}_3} * \frac{\text{g CO}_2}{\text{mol CO}_2} = \frac{\text{ton CO}_2}{\text{ton cemento}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

4.2 Selección de materiales

En este apartado se procederá a la comparación de distintos tipos de cementos teniendo en cuenta una serie de propiedades para determinar y seleccionar cuál de ellos será el cemento más ecosostenible. Quedarán excluidos los cementos con tecnologías descritas en el punto 3 debido a que no se menciona su posible uso en la norma UNE-EN 197-1:2011 (Excepto el uso de puzolanas y cenizas volantes). Dado a la gran variedad de cementos existentes se analizarán 4 cementos, con composiciones distintas entre sí. Cada uno de ellos son usados para distintas aplicaciones. Para solucionar este problema la selección se realizará para la fabricación de hormigón, una aplicación común a todos los tipos de cemento. Con ellos se realizará una comparación con respecto al cemento Portland tradicional, también llamado cemento tipo I. Las propiedades del cemento a analizar serán la resistencia a compresión, su precio, su durabilidad y por último por la huella de carbono que genera cada uno. Con esto se pretende descubrir cuál de estos cementos es la mejor alternativa al cemento tipo I.

Para empezar, se procederá a calcular la huella de carbono de cada uno de los cementos dado que los datos del cemento portland se basan entre un 95 y un 100% de clínker, para facilitar los cálculos, la huella de carbono y el precio de los cementos alternativos escogidos quedarán en función del porcentaje de clínker de cada cemento, el porcentaje de material cementoso suplementario aunque debería ser considerado para el cálculo de la huella de carbono, al no poseer datos de las emisiones de estos, no se tendrán en cuenta para facilitar los cálculos.

Según las fuentes usadas, que en este caso son la tesis doctoral [40] y el estudio de Amran, Makul, Fediuk, Lee, Vatin, Lee y Mohammed [43], los valores de la huella de carbono encontrados que más se repiten son los de 850 kg CO₂/ton cemento, por lo que se escogerá esta cifra como aquella a usar para el cálculo de la huella de carbono para cada tipo de cemento.

$$850 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{ton cemento}} * \% \text{ de clínker del cemento} = \frac{\text{kg CO}_2}{\text{ton cemento}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Con estos datos ahora se procederá a la etapa de selección, para ello se usará una matriz de decisión para determinar el mejor cemento entre los que se han encontrado en el mercado. La matriz de decisión constará de una tabla con los diferentes cementos y los datos de las propiedades anteriormente mencionadas con el fin de compararlas. Para cada propiedad se determinará si se quiere maximizar o por el contrario minimizar. Para maximizar se dividirá cada valor de la propiedad del material entre el valor más alto de la propiedad a estudiar. Para minimizar se dividirá el menor valor de la propiedad a estudiar entre cada valor de la propiedad del material. En este caso los valores a maximizar son las resistencias a compresión y los valores a minimizar el precio, la relación agua cemento y las emisiones de CO₂. Después de eso con los valores de la comparación de cada una de las propiedades se sumarán dichas propiedades según el material y el material más óptimo será aquel cuya suma sea mayor. Para el comportamiento ante la resistencia a los sulfatos se valorará de forma cualitativa y será una propiedad a maximizar, se les dará a las categorías no indica y SR (debido a que en la norma UNE 197-1 [42] se indica que los cementos resistentes a los sulfatos tendrán un SR en su nomenclatura) los valores 1 y 3 respectivamente y multiplicados por un factor según la importancia que tenga para su aplicación para luego sumar estos valores al total conseguido de los cementos analizados. Con ello se determinará la selección del cemento.

Los valores de resistencias serán los que especifique el nombre del tipo de cemento, aunque el propio cemento admita valores mayores, por lo que se escogerán los valores mínimos de resistencia final que son aquellos que corresponden al nombre del tipo de cemento usado.

Los valores de los factores empleados serán 0,25 para la resistencia a compresión inicial, 0,75 la resistencia final y el precio, un 0,65 la relación agua cemento máxima necesaria para un buen fraguado y finalmente un 1 para la generación de emisiones de CO₂ en la fabricación del propio cemento. Estos valores se justifican debido a la prioridad de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono de este trabajo, el precio que debe de ser lo más bajo posible para garantizar una viabilidad en su uso, la resistencia final del producto que garantizará si cumple en un futuro con las sollicitaciones mecánicas, la relación agua cemento que representa en este caso la durabilidad del material pues es la encargada de garantizar el correcto fraguado del cemento y finalmente la resistencia inicial.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Dado que anteriormente se ha explicado ya el estado actual de la tecnología de la fabricación del cemento se procederá ahora al estudio del diseño de 1 tonelada de cemento que consiga reducir su huella de carbono con respecto al cemento Portland a partir de la tesis doctoral de Cardim Carvalho Filho [40]. Para ello lo primero será realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) del cemento Portland para ver cuál es su impacto actual y para tener las referencias necesarias como para plantear un diseño capaz de disminuir las emisiones de CO₂ en esta industria.

Este ACV corresponderá con la extracción de las materias primas hasta la creación del propio cemento y los datos como se ha dicho en el apartado del plan de trabajo y metodología, consistirán en la generación de productos, emisiones, consumo de combustible y consumo de electricidad. Dado que en ocasiones las tablas de datos aparecen valores máximos y mínimos, para dar poder dar un único valor numérico para cada dato, se ha procedido a realizar la media entre esos valores máximos y mínimos para facilitar la interpretación de los datos. Las entradas auxiliares de materia prima serán obviadas debido a su bajo contenido en peso con respecto a la tonelada de cemento.

En cuanto a las entradas del proceso productivo se tendrán en cuenta las materias primas mencionadas anteriormente y el consumo energético ya sea eléctrico o por combustible fósil empleado para la producción. Las salidas, sin embargo, constan de la tonelada de cemento además de las emisiones de dióxido de carbono.

Las dos siguientes tablas, la tabla 29 y la tabla 30, muestra la cantidad de material necesario para producir una tonelada de cemento además de su distribución en tanto por ciento.

Tabla 29 Cantidad de materiales para la formación de una tonelada de cemento Portland

Material	Mínimo kg material/ton cemento	Máximo kg material/ton cemento	Media kg material/ ton cemento
Caliza	941	1240	1090,5
Arcilla	145	466	305,5
Arena	29	155	92
Hierro	14	16	15
Yeso	30	35	32,5
Suma	1159	1912	1535,5

Tabla 30 Proporción en masa de materiales para la formación de una tonelada de cemento Portland

	Mínimo	Máximo	Media
Caliza	0,811	0,648	0,71
Arcilla	0,125	0,243	0,198

Arena	0,025	0,081	0,059
Hierro	0,012	0,008	0,009
Yeso	0,0258	0,018	0,021

En cuanto al combustible usado en para la obtención de las materias primas y el transporte de estas, se usará fundamentalmente diésel, mientras que para calentar el horno del clínker se usará carbón. A continuación, se mostrará el consumo de combustible y energía necesaria para la obtención y preparación de la materia prima del cemento en las tablas 31, 32, 33 y 34 donde la tabla 31 corresponde con el consumo de diésel de las herramientas de la cantera, la 32 el consumo energético de cada una de las canteras implicadas en la obtención de las materias primas, la 33 el consumo energético de las operaciones de preparación para el horno y la 34 como el consumo energético del horno.

Tabla 31 Consumo de diésel en la cantera

Canteras	Perforadora	Martillo hidráulico	Pala cargadora	Excavadora	Dúmper	Camión
Diésel l/h	40	60	50	85	25	48

Tabla 32 Consumo energético en la cantera

Consumos		l diésel/ton cemento	MJ/ton cemento	l/ ton media	MJ/ton media
Cantera caliza	max	0,587	22,6	0,4815	18,55
	min	0,376	14,5		
Cantera arcilla	max	0,314	12,1	0,196	7,555
	min	0,078	3,01		
Cantera arena	max	0,272	10,5	0,1565	6,03
	min	0,041	1,56		
Camión caliza	max	1,12	43,2	0,986	38
	min	0,852	32,8		
Camión arcilla	max	0,149	5,74	0,0975	3,755
	min	0,046	1,77		
Camión arena	max	0,052	2	0,031	1,1925
	min	0,01	0,385		
Camión mena Fe	max	0,019	0,732	0,018	0,6935
	min	0,017	0,655		
				1,9665	75,776
Consumo total energía fósil y combustible usados					

Tabla 33 Consumo energético del horno

Consumos MJ/ton cemento			Media
Trituración caliza	Max	22,9	18,75
	Min	14,6	
Prehomo caliza	Max	1	36,5
	Min	72	
Prehomo arcilla	Max	1,18	1,96
	Min	2,74	
Tratamiento arena y mena Fe	Max	0,769	1,5295
	Min	2,29	
Trituración crudo	Max	1,26	73,48
	Min	145,7	
Cocción del crudo a clínker	Max	123	122,9
	Min	122,8	
Preparación cemento	Max	110,6	123,1
	Min	135,6	
Expedición cemento	Max	122,7	62,23
	Min	1,76	
Preparación carbón	Max	1,6	8,2
	Min	14,8	
			448,6495
			Suma total

Tabla 34 Consumo energético del carbón en el horno

Consumo	MJ/ton cemento		Media
Combustible hulla+coque	max	3347,4	3339,45
	min	3331,5	

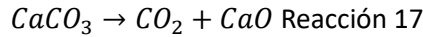
Con esto, la tesis donde se han obtenido estos datos ha calculado la masa emitida de CO₂ en el proceso extractivo y de preparación de las materias primas del cemento con los datos reflejados en la tabla 35.

Tabla 35 Emisiones de CO₂ en el proceso de producción de fabricación del cemento sin contar el horno

Emisiones proceso	Rango	g CO ₂	Media
Canteras calizas	max	2129	1747
	min	1365	
Trituración caliza	max	361	1250
	min	2139	
Camión caliza	max	4062	3576
	min	3090	
Prehomo caliza	max	4062	3576
	min	3090	
Cantera arcilla	max	253	213
	min	173	
Camión arcilla	max	1140	711,5
	min	283	
Prehomo arcilla	max	540	353,5
	min	167	
Cantera arena	max	985	566
	min	147	
Camión arena	max	189	112,65
	min	36,3	
Tratamiento arena	max	243	174
	min	105	
Camión mena Fe	max	68,9	65,25
	min	61,6	
Tratamiento Fe	max	94,9	87,45
	min	80	
Trituración crudo	max	21422	19749
	min	18076	
Cocción crudo	max	18056	17154
	min	16252	
Preparación cemento	max	19934	18985
	min	18036	
Expedición cemento	max	259	247
	min	235	
Preparación carbón	max	2172	2063,5
	min	1955	
		70630,85 g	
		Suma	

Teniendo ya las emisiones causadas por el proceso extractivo y de preparación de las materias primas, se llevará a cabo el cálculo de las emisiones causadas por la descarbonatación de la caliza, para ello se hará un cálculo estequiométrico para encontrar la equivalencia del CO₂ en masa con respecto a la CaCO₃.

Cálculo del CO₂ emitido debido a la descomposición térmica del CaCO₃ (reacción 17) en el horno usando la ecuación 1



1,0905 ton CaCO₃ 1 ton cemento 1 mol CaCO₃ = 100,086 gramos 1 mol CO₂ = 44 gramos

$$1,0905 \frac{\text{ton CaCO}_3}{\text{ton cemento}} * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{100,086 \text{ g CaCO}_3} * \frac{1 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol CaCO}_3} * \frac{44 \text{ g CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} = 0,4794 \frac{\text{ton CO}_2}{\text{ton cemento}}$$

$$\text{Por lo que: } 898,766 - 479,4 = 417,366 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg cemento}}$$

Dado que en el documento las emisiones del horno se muestra que son 898,766 kg CO₂/kg cemento , los faltantes 419,366 CO₂/kg cemento vendrán de la quema de carbón en el horno por lo que habrá 479,366 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento producidos por las reacciones de descarbonatación de la caliza, 419,366 kg por cada tonelada de cemento debido a la combustión del carbón y de 70 kg por cada tonelada de cemento debido al proceso de extracción y transporte de las materias primas para la producción del cemento pudiendo ver el porcentaje de emisiones generadas por el proceso de obtención de materias primas, las emisiones generadas por el horno sin contar la descarbonatación y las emisiones generadas por la descarbonatación en la figura 34.

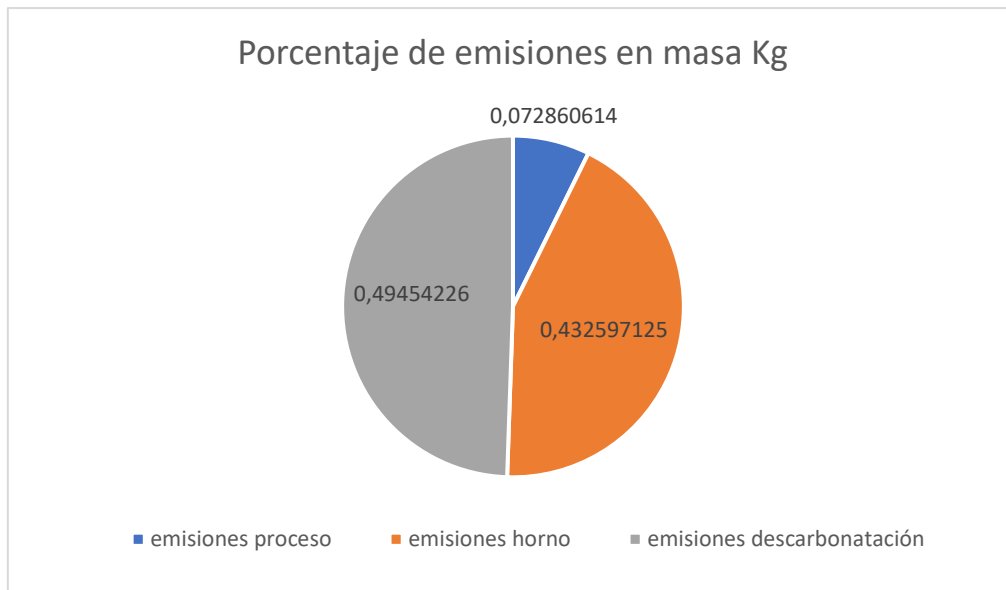


Figura 34 Porcentaje de emisiones en la fabricación del cemento

Con los datos obtenidos en las tablas y el gráfico se puede ver principalmente 3 cosas, el gran peso del horno, que genera el 93% de las emisiones totales de CO₂ a la atmósfera, que las emisiones de la descarbonatación son ligeramente inferiores a las dichas al principio de este trabajo (entre el 50 y el 60%) y que el proceso que más energía consume es la etapa de formación del clínker. En los datos referidos a la emisión de dióxido de carbono, se incluyen los datos del transporte y de la maquinaria usada en la extracción de las materias primas. Además, si se hace la suma de las emisiones totales se obtiene que se emiten unos 967 kg de CO₂/ton cemento, valores superiores a los obtenidos en fábricas

europas de cemento tipo 1 donde los valores de emisiones de dióxido de carbono rondan los 850 kg CO₂/ton cemento, sin embargo estos sí ronda los valores de emisiones medios del cemento tipo 2 por lo que o en esta fábrica está desactualizada o esta fábrica produce cemento Portland tipo 2.

5.2 PROCESO DE SELECCIÓN DEL CEMENTO

Sabiendo ya la cantidad de emisiones generadas, el siguiente paso será encontrar la forma de disminuirlas. Para ello se determinarán diferentes tipos de cemento los cuales puedan disminuir la cantidad de dióxido de carbono generado.

Lo primero será buscar en el mercado diferentes tipos de cemento que sean compatibles con la incorporación de cenizas volantes. Se ha escogido este tipo de material cementoso suplementario debido a su fácil obtención y disponibilidad y este trabajo en cuestión se basará en los cementos citados en la tesis doctoral realizada en la URJC por Elvira Sabador Azorín [41] que son el cemento puzolánico IV/A y los cementos Portland con puzolana II/A 80-94% clínker y el II/B 65-79% clínker. Dado que no se han encontrado datos sobre estos cementos, se ha buscado en catálogo de la empresa de cementos HOLCIM alternativas lo más similares posibles a las mencionadas en la tesis, siendo estas el cemento IV/B (V) 32,5 el cemento II/B 65-79% que también se encuentra con el nombre de CEM II/B-M (S-L) 42,5 R y el cemento II/A-S 42,5 N/SRC. Estos cementos han sido buscados teniendo en cuenta la norma UNE-EN 197 [42] que será explicada a continuación.

La norma a la que tienen que estar sujetos es la norma UNE-EN 197 (Esquema de tipos de cemento en la figura 35) [42] la cual dictamina las composiciones, especificaciones y los criterios de conformidad de los cementos comunes. Se consideran a 27 tipos cementos como cementos comunes en Europa. Entre otras cosas, esta norma recoge un límite superior de C₃A para los cementos resistentes a sulfatos, un ensayo de puzolanicidad positivo a los 8 días (solo para cementos tipo IV) y un contenido máximo en sulfatos.

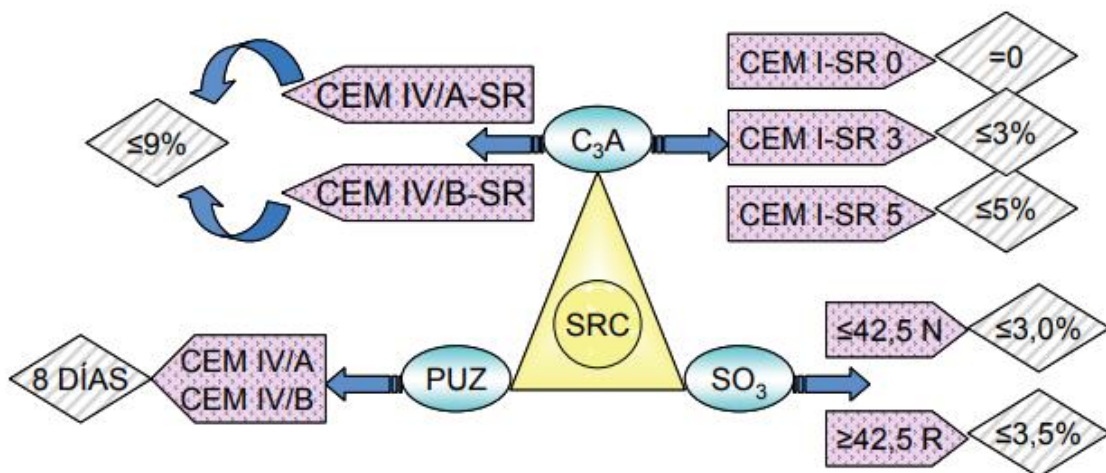


Figura 35 Esquema de la norma UNE-EN 197 contenida en Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland [1]

Otro aspecto que determina esta norma es la nomenclatura de los diferentes tipos de cemento, el cemento Portland ordinario tomará el nombre de CEM I seguido de la resistencia mecánica de dicho cemento, seguidamente se añadirá la letra N si dicho cemento es un cemento de resistencia inicial normal o la letra R si es un cemento de resistencia inicial alta. En cuanto a los cementos Portland con adiciones, tomarán el nombre de CEM II y seguidamente una barra (/) junto con una letra que

determinará el tipo de adición que se le ha aplicado al cemento, entre esas adiciones se encuentran la S (escorias de alto horno), la D (humo de sílice), la P (puzolana natural), Q (puzolana natural calcinada) la V (ceniza volante silíceas) y otras 3 más que indican que se les ha añadido componentes de caliza. Si se usan dos tipos de adiciones, se usará una M y en paréntesis se pondrá la letra de cada tipo de adición que se ha usado en el cemento además en los cementos CEM II se seguirá usando la N y la R para determinar su resistencia inicial además del número que indica su resistencia mecánica. Por último, los cementos puzolánicos y los cementos puzolánicos compuestos se tratan de los cementos denominados CEM III, CEM IV y CEM V y al igual que en los CEM II, seguidamente se les añadirá la letra que le corresponda a cada tipo de cemento. En los CEM IV y los CEM V, además se tendrá que añadir las letras entre paréntesis del tipo de adición usado además de la resistencia del cemento en número y una R si es de resistencia inicial alta, una N si es de resistencia inicial normal o una L si es de resistencia inicial baja. Si el cemento se trata de un cemento resistente a los sulfatos, se deberá añadir las letras SR y si el cemento es un cemento de bajo calor de hidratación las letras LH. En caso de cumplir estas dos características, se tendrá que añadir la combinación LH/SR.

Tabla 36 Composiciones norma UNE-EN 197

Tipos Principales	Denominación	Designación	Contenido de C_3A (%) ⁴⁾	Composición (proporción en masa ¹⁾)				
				Componentes principales				Componentes minoritarios adicionales
				Clinker, K	Escoria de horno alto, S	Puzolana natural, P	Ceniza volante Silíceas, V	
CEM I	Cemento portland resistente a los sulfatos	CEM I-SR 0	0	95-100	-	-	-	0-5
		CEM I-SR 3	3					
		CEM I-SR 5	5					
CEM III ³⁾	Cemento de horno alto resistente a los sulfatos	CEM III/B-SR	-	20-34	66-80	-	-	0-5
		CEM III/C-SR	-	5-19	81-95	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico resistente a los sulfatos ²⁾	CEM IV/A-SR	≤ 9	65-79	-	21-35		0-5
		CEM IV/B-SR	9	45-64	-	36-55		0-5

También hay que tener en cuenta los métodos de ensayo de los cementos y los valores de las propiedades mecánicas y de composición que deberá tener el cemento para su correcto servicio, los cuales también aparecen en la norma UNE-EN 196, la cual aparece en el libro Introducción a la Fabricación y Normalización del Cemento Portland [1] y en las tablas 36 y 37.

Tabla 37 Requerimiento mínimo norma UNE-EN 196

Clase de resistencia	Resistencia a compresión ²⁾ UNE-EN 196-1 (N/mm ²)				Tiempo de principio de fraguado UNE-EN196-3 (min)	Estabilidad de volumen UNE-EN196-3 (Expansión, mm)	Calor de Hidratación ³⁾ (J/g)	
	Resistencia inicial		Resistencia nominal				UNE-EN 196-9	UNE-EN 196-8
	2 días	7 días	28 días				41 horas	7días
32,5 L ¹⁾	-	12,0	≥32,5	52,5	≥75	≤10	≤270	
32,5 N	-	16,0						
32,5 R	10,0	-						
42,5 L ¹⁾	-	≥16,0	≥42,5	62,5	≥60			
42,5 N	≥10,0	-						
42,5 R	≥20,0	-						
52,5 L ¹⁾	≥10,0	-	≥52,5	-	≥45			
52,5 N	≥20,0	-						
52,5R	≥30,0	-						

PROPIEDADES MECÁNICAS Y COMPOSICIÓN

1 CEM IV/B (V) 32,5 N

Este cemento es un cemento puzolánico para trabajos de albañilería, hormigón armado o para cuando se requiere el uso de grandes cantidades de hormigón. Se trata entonces de un cemento puzolánico en el cual la puzolana usada es ceniza volante de síliceas. Este cemento cumple con la norma UNE-EN 197-1 y sus características pueden observarse en las tablas 38, 39 y 40.

Tabla 38 Porcentaje en peso

Componentes	(%) ⁽¹⁾
Clínter	45-64
Ceniza volante sílicea	36-55
Componentes minoritarios ⁽²⁾	0-5

Tabla 39 Características mecánicas

Resistencia a compresión (MPa)		Inicio de fraguado (min)	Expansión (mm)
Inicial (7 días)	Normal (28 días)		
≥ 16	≥ 32,5 y ≤ 52,5	≥ 75	≤ 10

Tabla 40 Otros datos

Propiedad	Exigencia ⁽¹⁾
Sulfato (SO ₃)	≤ 3,5
Cloruros (Cl ⁻)	≤ 0,10
Puzolanicidad	A 8 o 15 días

2 CEM II/B-M (S-L) 42,5 R

Este cemento se trata de un cemento de adición con dos componentes siendo una combinación del clinker de cemento Portland ordinario con cenizas volantes silíceas y de caliza con un contenido en carbono orgánico total menor o igual a 0,5% en masa. Este cemento puede ser usado para la fabricación de hormigón en masa u hormigón armado, para ser usado como elemento estructural de gran volumen y para hormigones de trabajabilidad prolongada. Este cemento cumple con la norma UNE-EN 197-1. y sus características pueden observarse en las tablas 41, 42 y 43.

Tabla 41 Porcentaje en peso

Componentes	(%) ⁽¹⁾
Clinker	65-79
Ceniza volante silícea	21-35
Componentes minoritarios ⁽²⁾	0-5

Tabla 42 Características mecánicas

Resistencia a compresión (MPa)		Inicio de fraguado (min)	Expansión (mm)
Inicial (2 días)	Normal (28 días)		
≥ 20	≥ 42,5 y ≤ 62,5	≥ 60	≤ 10

Tabla 43 Otros datos

Propiedad	Exigencia ⁽¹⁾
Sulfato (SO ₃)	≤ 3,5 %
Cloruros (Cl ⁻)	≤ 0,10%
Puzolanicidad	A 8 días
C ₃ A en clinker ⁽²⁾	≤ 9,0 %

3 CEM II/A-S 42,5 N/SRC

Este cemento se trata de una combinación de cemento Portland ordinario y de escorias de alto horno lo que hace que pueda usarse como base para la creación de hormigones armados o en masa con una menor huella de carbono y además podrá ser usado en construcciones emplazadas en ambientes químicamente agresivos, sobre todo en atmósferas marinas o ricas en sulfatos. El hecho de estar compuesto de escorias de altos hornos conferirá a este cemento una mayor resistencia al ataque por sulfatos o por sales y es por ello que en su nomenclatura se encuentra un SR. Este cemento cumple con la norma UNE-EN 197-1 y sus características pueden observarse en las tablas 44, 45 y 46.

Tabla 44 Porcentaje en peso

Componentes	(%) ⁽¹⁾
Clinker	80-94
Escoria de horno alto	6-20
Componentes minoritarios ⁽²⁾	0-5

Tabla 45 Características mecánicas

Resistencia a compresión (MPa)		Inicio de fraguado (min)	Expansión (mm)
Inicial (2 días)	Normal (28 días)		
≥ 10	≥ 42,5 y ≤ 62,5	≥ 60	≤ 10

Tabla 46 Otros datos

Propiedad	Exigencia ⁽¹⁾
Sulfato (SO ₃)	≤ 3,5 %
Cloruros (Cl ⁻)	≤ 0,10%
C ₃ A ⁽²⁾ (según UNE 80303-1)	≤ 6,0 %
C ₃ A + C ₄ AF ⁽²⁾ (según UNE 80303-1)	≤ 22,0%

4 CEM I 52,5 R

Se trata de cemento Portland ordinario y por lo tanto no tiene restricciones en su uso siempre y cuando se use en ambientes donde las condiciones atmosféricas no sean un problema (poca salinidad o pocos sulfatos) además posee una R por lo que este tipo de cemento es un cemento de alta resistencia inicial por tanto rico en C₃S. Es usado para la fabricación de hormigón en todas sus variantes. Este cemento cumple con la norma UNE-EN 197-1 y sus características pueden observarse en las tablas 47, 48 y 49.

Tabla 47 Porcentaje en peso

Componentes	(%) ⁽¹⁾
Clínker	95-100
Componentes minoritarios ⁽²⁾	0-5

Tabla 48 Características mecánicas

Resistencia a compresión (MPa)		Inicio de fraguado (min)	Expansión (mm)
Inicial (2 días)	Normal (28 días)		
≥ 30	≥ 52,5	≥ 45	≤ 10

Tabla 49 Otros datos

Propiedad	Exigencia ⁽¹⁾
Pérdida por calcinación	≤ 5,0 %
Residuo insoluble	≤ 5,0 %
Sulfato (SO ₃)	≤ 4,0 %
Cloruros (Cl ⁻)	≤ 0,10%

Teniendo ya las propiedades mecánicas, se procederá a la búsqueda de la cantidad de huella de carbono de los cementos escogidos para el análisis cuyos resultados se pueden ver en la tabla 50 . Dado que los datos del cemento Portland se basan entre un 95 y un 100% de clínker, para facilitar los cálculos se considerará que el cemento Portland tipo I está compuesto en su totalidad por clínker y por tanto la huella de carbono y el precio de las cementos alternativos escogidos quedarán en función de su porcentaje de clínker, su porcentaje de material cementoso suplementario aunque debería ser considerado en el cálculo de la huella de carbono, como no se poseen datos de las emisiones que producen serán obviados para facilitar los cálculos. Para empezar y consultando las fuentes los valores de la huella de carbono encontrados que mas se repiten son los de 850 kgCO₂/ton cemento. Se elegirá esta cifra como aquella a usar para el cálculo de la huella de carbono para cada tipo de cemento.

Cálculo de la huella de carbono de cada uno de los cementos usando la ecuación 2.

Huella del carbono CEM I= 850kg/ton cemento

Huella de carbono CEM II/B-M (S-L) 42,5 R $0,65 * 850 = 552,5 \frac{kgCO_2}{ton}$ o $0,79 * 850 = 671,5 \frac{kgCO_2}{ton}$

Huella de carbono CEM II/A-S 42,5 N/SRC $0,8 * 850 = 680 \frac{kgCO_2}{ton}$ o $0,94 * 850 = 799 \frac{kgCO_2}{ton}$

Huella de carbono CEM IV/B (V) 32,5 N $0,45 * 850 = 382,5 \frac{kgCO_2}{ton}$ o $0,64 * 850 = 544 \frac{kgCO_2}{ton}$

Dado que hay dos valores de huella de carbono se hará una media entre ellos para la posterior selección de materiales.

Tabla 50 Datos en kg CO₂/ton cemento

CEM I 52,5 R kg CO ₂ /ton cemento		CEM II BM (S-L) 42,5 R kg CO ₂ /ton cemento		CEM II A-S 42,5 N/SRC kg CO ₂ /ton cemento		CEM IV B(V) 32,5 N kg CO ₂ /ton cemento	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
850	850	552,5	671,5	680	799	382,5	544
Media		Media		Media		Media	
850 kg CO ₂ /ton cemento		612 kg CO ₂ /ton cemento		739,5 kg CO ₂ /ton cemento		463,25 kg CO ₂ /ton cemento	

PRECIO

El siguiente factor por analizar será el del precio de los cementos, dado que no aparecen los precios de los cementos escogidos para el análisis en el catálogo de Holcim, se buscarán en la base de datos PREOC del 2023 la cuál es una página que contiene una base de datos del precio de diferentes materiales de construcción además de un estimador de precios de obras. En caso de que no se encuentre información del precio del cemento a buscar, se escogerá un cemento lo más similar posible y se adoptará su precio

para tener un dato orientativo. Además, se les descontará el precio del IVA para que se asemeje lo máximo posible al precio de salida de la fábrica. El precio será multiplicado por 4 para obtener el precio de 100 kg de cemento.

Precio CEM I = 140€ 1 ton. Para 100 kg=14€

Precio CEM II BM= 142€ 1ton. Para 100 kg=14,2€

Precio CEM II/A-S 42,5 N/SRC= 140€ 1 ton. Para 100 kg= 14€

Precio CEM IV/B (V) 32,5 N= 186€ 1 ton. Para 100 kg= 18,6€

**Dado que en la base de datos no se ha encontrado todos los productos seleccionados se ha escogido para el CEM II /A-S 42,5 N/SRC el precio del CEM II/A-S 42,5 N y para el CEM IV/B (V) 32,5 N el precio del CEM IV/A-SR 42,5.*

DURABILIDAD

En cuanto a la durabilidad lo primero de todo para garantizarla, es necesario que el hormigón aguante los efectos de agentes externos como el agua, sulfatos, ácidos o sales para ello a partir de la información suministrada por el documento ACI 201 Guía para la Durabilidad del Hormigón [44] de Argentina y por el Código estructural capítulo 9 Real Decreto 470/2021 [45]. El problema con el agua radica en la capacidad de penetrar el cemento u hormigón y llegue a las varas de acero o que ese mismo agua se congele en los huecos existentes en el hormigón y por ciclos de congelación y descongelación termine rompiéndolo. Para evitar esto una medida que debe ser incluida es aportar al cemento una de huecos internos lo suficientemente amplios para que estos ciclos de congelamiento y descongelamiento que puedan ocurrir en el interior del cemento debido a que posee agua atrapada sean lo suficientemente amplios como para evitar la rotura del mismo, lo cual se conseguirá manipulando la cantidad de agua arena y cemento usada en la formación de dicho cemento o con la aireación del cemento u hormigón para favorecer el crecimiento de los huecos a un tamaño lo suficientemente amplio como para que estos ciclos no afecten a la integridad del material. Además de usar una relación agua cemento usada para la formación del hormigón lo más baja posible para así garantizar una buena conformabilidad además de evitar la formación de una abundante porosidad que puede causar la penetración del agua en el interior del cemento o del hormigón como se puede observar en la tabla 51. Esto último también es efectivo en el caso de la protección ante sulfatos (tabla 52), sales o gases (como el dióxido de carbono que puede producir la carbonatación del hormigón o el cemento) que reaccionen con el cemento u hormigón debido a que tanto las sales como los sulfatos pueden ser transportadas por el agua y que los gases al igual que el agua tendrían un canal abierto para entrar en la estructura del cemento u hormigón. Para una mayor protección en el cemento, la adición de compuestos en el mismo puede provocar una mejora en la resistencia ante sulfatos o sales

Tabla 51 Relación agua cemento máxima para cada tipo de cemento.

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	Ila	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima Relación a/c	masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tabla 52 Resistencia a sulfatos según los datos de las descripciones técnicas

RESISTENCIA A SULFATOS			
CEM I	CEM II/ BM	CEM II/ A-S	CEM IV B(V)
No indica	No indica	RS	No indica

SELECCIÓN FINAL DEL CEMENTO

Tabla 53 Valores de los datos analizados de los cuatro tipos de cementos escogidos para la selección

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	30	20	10	16
Resistencia a compresión final MPa	52,5	42,5	42,5	32,5
Precio €/100 kg	14	14,2	14	18,6
Relación agua cemento máxima	0,65	0,45	0,45	0,5
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	850	612	739,5	463,3

Tablas 54 Maximización y minimización

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	1	0,66666667	0,33333333	0,53333333
Resistencia a compresión final MPa	1	0,80952381	0,80952381	0,61904762
Precio €/100 kg	1	0,98591549	1	0,75268817
Relación agua cemento máxima	0,69230769	1	1	0,9
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	0,54505882	0,75702614	0,62650439	1

Tabla 55 Maximización y minimización multiplicados por el factor. Resultado

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	0,25	0,16666667	0,08333333	0,13333333
Resistencia a compresión final MPa	0,75	0,60714286	0,60714286	0,46428571
Precio €/100 kg	0,5	0,49295775	0,5	0,37634409
Relación agua cemento máxima	0,51923077	0,75	0,75	0,675
Emissiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	0,54505882	0,75702614	0,62650439	1
	2,56428959	2,77379341	2,56698059	2,64896313

Tabla 56 Factor de conversión y maximización de la resistencia a sulfatos

Factor		CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
0,5	Resistencia sulfatos	1	1	3	1
		0,5	0,5	1,5	0,5

Tabla 57 Resultados finales de la selección de materiales

Resultados en medio agresivo			
3,06428959	3,77379341	4,06698059	3,64896313

Analizados ya los cementos con los valores de resistencia mecánica más bajos aportados en las tabla 53, el cemento para la formación de hormigón armado que más se adecua en medios no agresivos (teniendo en cuenta las tablas 54 y 55 las cuales reflejan el proceso de selección) sería el CEM IV/B (V) 32,5 N muy seguido del CEM II/B-M (S-L) 42,5 R mientras que teniendo en cuenta la presencia de medios agresivos (tablas 56 y 57 las cuales reflejan el proceso de selección teniendo en cuenta el medio agresivo) sería el CEM II/A-S 42,5 N/SRC.

Dado que hay variaciones en cuanto a la resistencia a compresión final e inicial en algunos de los cementos del catálogo, se volverá a hacer el mismo proceso de selección a los cementos anteriormente analizados, pero tomando los valores alternativos de resistencia mecánica. Para ello primero se aumentará el valor de resistencia a compresión final del CEM IVB(V) a su valor máximo (tabla 58) encontrándose un escenario en el que todos los cementos poseen una resistencia a compresión final del mismo valor y en el segundo análisis se modificarán las resistencias a compresión final del cemento II BM y del cemento II A-S a sus valores máximos (tabla 63), este valor máximo es común para ambos cementos y es de 62,5 MPa

Tabla 58 Valores de los datos analizados de los distintos tipos de cementos escogidos para la selección con máxima resistencia en cem iv b(v)

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	30	20	10	16
Resistencia a compresión final MPa	52,5	52,5	52,5	52,5
Precio €/100 kg	14	14,2	14	18,6

Relación agua cemento máxima	0,65	0,45	0,45	0,5
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	850	612	739,5	463,3

Tabla 59 Maximización y minimización con máxima resistencia en cem iv b(v)

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	1	0,66666667	0,33333333	0,53333333
Resistencia a compresión final MPa	1	1	1	1
Precio €/100 kg	1	0,98591549	1	0,75268817
Relación agua cemento máxima	0,69230769	1	1	0,9
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	0,54505882	0,75702614	0,62650439	1

Tabla 60 Multiplicación de los valores maximizados y minimizados por el factor de conversión y suma para la determinación del mejor cemento con máxima resistencia en cem iv b(v)

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	0,25	0,16666667	0,08333333	0,13333333
Resistencia a compresión final MPa	0,75	0,75	0,75	0,75
Precio €/100 kg	0,5	0,49295775	0,5	0,37634409
Relación agua cemento máxima	0,51923077	0,75	0,75	0,675
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	0,54505882	0,75702614	0,62650439	1
	2,56428959	2,91665056	2,70983773	2,93467742

Tabla 61 Matriz cualitativa de resistencia a sulfatos con máxima resistencia en cem iv b(v)

Factor		CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
0,5	Resistencia sulfatos	1	1	3	1
		0,5	0,5	1,5	0,5

Tabla 62 Resultados finales de la selección de materiales con máxima resistencia en cem iv b(v)

Resultados en medio agresivo			
3,06428959	3,91665056	4,20983773	3,93467742

En el caso en el que el cemento IV B(V) posee su máximo de resistencia mientras que el resto de los cementos poseen el mínimo de resistencia especificado en las tablas del catálogo de cementos que se aportó en el apartado anterior, el cemento más óptimo obtenido sin tener en cuenta el medio agresivo (teniendo en cuenta las tablas 59 y 60 los cuales reflejan el proceso de selección) es el cemento IV B(V). En este caso, todos los cementos analizados poseen el mismo valor de resistencia mecánica el cual es de 52 MPa. Sin embargo, cuando se agrega a esta matriz, la resistencia a medios agresivos (tablas 61 y 62 las cuales reflejan el proceso de selección teniendo en cuenta el medio agresivo) el cemento más óptimo obtenido es el CEM II A-S

Tabla 63 Valores de los datos analizados de los distintos tipos de cementos escogidos para la selección con máxima resistencia final en todos los cementos

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	30	20	10	16
Resistencia a compresión final MPa	52,5	62,5	62,5	52,5
Precio €/100 kg	14	14,2	14	18,6
Relación agua cemento máxima	0,65	0,45	0,45	0,5
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	850	612	739,5	463,3

Tabla 64 Maximización y minimización con máxima resistencia final en todos los cementos

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	1	0,66666667	0,33333333	0,53333333
Resistencia a compresión final MPa	1	1,19047619	1,19047619	1
Precio €/100 kg	1	0,98591549	1	0,75268817
Relación agua cemento máxima	0,69230769	1	1	0,9
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	0,54505882	0,75702614	0,62650439	1

Tabla 65 Multiplicación de los valores maximizados y minimizados por el factor de conversión y suma para la determinación del mejor cemento

	CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
Resistencia a compresión inicial MPa	0,25	0,16666667	0,08333333	0,13333333
Resistencia a compresión final MPa	0,75	0,89285714	0,89285714	0,75
Precio €/100 kg	0,5	0,49295775	0,5	0,37634409
Relación agua cemento máxima	0,51923077	0,75	0,75	0,675
Emisiones de CO ₂ CO ₂ kg/ton cemento	0,54505882	0,75702614	0,62650439	1
	2,56428959	3,0595077	2,85269487	2,93467742

Tablas 66 Matriz cualitativa de resistencia a sulfatos y resultados finales de la selección de materiales con máxima resistencia final en todos los cementos

Factor		CEM I	CEM II BM	CEM II A-S	CEM IV B(V)
0,5	Resistencia sulfatos	1	1	3	1
		0,5	0,5	1,5	0,5

Tabla 67 Resultados finales con máxima resistencia final en todos los cementos

Resultados en medio agresivo			
3,06428959	4,0595077	4,35269487	3,93467742

En el caso en el que todos los cementos poseen el máximo de resistencia, el cemento más óptimo obtenido sin tener en cuenta el medio agresivo (teniendo en cuenta las tablas 64 y 65 las cuales reflejan el proceso de selección) es el cemento IV B(V) aún poseyendo valores de resistencia igual al cemento tipo uno y de menores resistencias de compresión final que las otras dos opciones a sustituir del cemento II BM y del cemento II A-S. Sin embargo, cuando se agrega a esta matriz, la resistencia a medios agresivos (teniendo en cuenta las tablas 66 y 67 las cuales reflejan el proceso de selección teniendo en cuenta el medio agresivo) el cemento más óptimo obtenido es el CEM II A-S.

6. CONCLUSIONES

Con toda la información y resultados obtenidos se puede concluir que:

1. En cuanto a los SCM:

- Reducen las emisiones de dióxido de carbono (CO₂)
- Mejoran la resistencia mecánica del cemento, especialmente a largo plazo, al formar productos hidratados adicionales que refuerzan la matriz cementicia.
- Aumentan la durabilidad del cemento,
- Modifican la trabajabilidad del cemento.

2. En cuanto al uso de cemento del cemento de sulfoaluminato de calcio:

- La reducción de emisiones, el sulfoaluminato de calcio (CSA) requiere una menor temperatura de sinterizado y por lo tanto una menor cantidad de combustible además de una cantidad menor de arcilla.
- La mejora de propiedades mecánicas, el CSA tiene una rápida hidratación y endurecimiento haciendo que este cemento posea una alta resistencia mecánica inicial.

3. En cuanto al uso de aglutinantes activados por álcalis para la formación de geopolímeros:

- La reducción de emisiones dado que al no requerir la descomposición térmica del CaCO₃, los aglutinantes activados por álcalis pueden alcanzar altas resistencias superiores al cemento Portland ordinario.
- Una gran estabilidad química, los aglutinantes activados por álcalis tienen una alta resistencia al ataque por ácidos, son muy estables químicamente y resistentes a la carbonatación o al ataque de sales o sulfatos.
- Dificultad de control para su procesamiento, tienen una cinética de reacción muy rápida y sensible a las variaciones de temperatura, humedad y composición, lo que dificulta su control, reproducibilidad y su procesado.

4. En cuanto al uso de rayos UVA en cementos con ceniza volante como SCM:

- Permite la entrada en la estructura del cemento dióxido de carbono que favorece la formación de carbonato de calcio en la estructura del cemento
- Provoca una pérdida de masa del cemento, una modificación de la microestructura y una disminución de las fases hidratadas como el CSH y el Ca(OH)₂
- Mejora la resistencia mecánica del cemento con adición de cenizas volantes hasta un 3% de CO₂, pero una excesiva carbonatación puede provocar una disminución de propiedades y fisuras en el cemento.
- Reduce las emisiones de dióxido de carbono del cemento al capturar el CO₂ en el ambiente y almacenarlo en el cemento como carbonato de calcio.

5. En cuanto al uso de polvo de mármol:

- Mejora de la resistencia mecánica puesto que el polvo de mármol actúa como un material de relleno que reduce la porosidad y los defectos del cemento, además de reaccionar con el hidróxido de calcio libre para formar silicato de calcio hidratado. Sin embargo, esta mejora solo permite hasta un 15% de sustitución.
- Reduce las emisiones de CO₂, el polvo de mármol sustituye parcialmente al clínker. Además, el polvo de mármol es capaz de capturar CO₂ del ambiente mediante un proceso de carbonatación que forma carbonato de calcio.
- Disminuye la trabajabilidad requiriendo un mayor contenido de agua o el uso de aditivos superplastificantes para mejorar la trabajabilidad.

6. En cuanto al uso del vidrio reciclado en el cemento:

- El vidrio reciclado puede sustituir parcialmente a la arena y al cemento, lo que reduce el uso de materias primas no renovables y las emisiones de CO₂ en la producción de cemento.
- Mejora la resistencia mecánica del hormigón, siempre que no se exceda entre el 15% y el 25% para la arena y entre el 10% y el 20% para el cemento.
- Empeora la trabajabilidad del hormigón, por lo que se requiere un ajuste del contenido de agua o el uso de aditivos superplastificantes para mejorar la consistencia de la mezcla.
- Contribuye a la captura de CO₂ del ambiente mediante un proceso de carbonatación, que forma carbonato de calcio en la estructura del hormigón.

7. Con respecto al uso de combustibles alternativos:

- Reducción de las emisiones generadas por el calentamiento del horno.
- Combinado con la producción de cemento con SCM la disminución de las emisiones de dióxido de carbono es mucho mayor.
- Mucho más barato.

8. Con respecto al uso de hormigón reciclado para la fabricación de cemento:

- Mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del nuevo hormigón. Sin embargo, el hormigón reciclado también puede presentar algunos inconvenientes, como una mayor absorción de agua, una menor trabajabilidad y una mayor variabilidad en las características del material.
- Reducción de las emisiones de dióxido de carbono debido sustituye parcialmente al cemento además de que el hormigón reciclado puede capturar CO₂ del aire por un proceso de carbonatación.

A parte de todo lo anterior la combinación de tecnologías como el calcinador solar junto a la aplicación de SCM, hormigón reciclado o el uso de vidrio reciclado, puede provocar mayores disminuciones en la emisión de dióxido de carbono debido a la acción conjunta de la disminución del CaCO₃ existente en el calcinador y de la eliminación de combustible para calentar al calcinador.

9. Con respecto al ciclo de vida:

- El proceso principal de las emisiones de dióxido de carbono se da en el horno con un 93% de las emisiones emitidas de dióxido de carbono siendo el resto generadas por la obtención y transporte de las materias primas.
- Ese 93% de emisiones es la suma de la contribución de la quema de combustible y de las emisiones causadas por la descarbonatación del carbonato cálcico causando un 49% y un 43% de las emisiones totales por la producción del cemento.

10. Con respecto a la selección del cemento más ecoeficiente:

- En todos los casos estudiados para condiciones de ambiente normales, el cemento más idóneo para sustituir al cemento Portland ordinario es el CEM II/B-M (S-L) 42,5 R.
- En todos los casos estudiados para condiciones de ambiente agresivas, el cemento más idóneo para sustituir al cemento Portland ordinario es el CEM II/A-S 42,5 N/SRC.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sanjuán Barbudo, M. A. (2004). In Chinchón Yepes S. (Ed.), *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland / miguel ángel sanjuán barbudo, servando chinchón yepes* San Vicente del Raspeig : Universidad d'Alacant
- [2] Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
- [3] Betancourt Rodríguez, S. (2017). In Artiles Castro M., Ravelo Romero L. (Eds.), *Materiales para la construcción / sergio betancourt rodríguez* Santa Clara, Cuba : Editorial Feijóo
- [4] Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). *Materiales Para Ingeniería Civil*. Pearson Educación.
- [5] Benhelal, E., Shamsaei, E., & Rashid, M. I. (2021). Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 104, 84-101.
- [6] Sivakrishna, A., Adesina, A., Awoyera, P. O., & Rajesh Kumar, K. (2020). Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today : Proceedings*, 27, 54-58.
- [7] Ahmed, A., Kamau, J., Pone, J., Hyndman, F., & Fitriani, H. (2019). Chemical reactions in pozzolanic concrete. *Mod.Approaches Mater.Sci*, 1, 128-133
- [8] Soria Santamaría, F. (1963). Puzolanas y cementos puzolánicos. *Materiales De Construcción*, 13(111), 47-59
- [9] Rangrazian, M., Madandoust, R., Mahjoub, R., & Raftari, M. (2023). Experimental investigations on the engineering properties of pozzolanic concrete reinforced with fibers and the reduction of CO₂ emissions: A case study on local mineral pozzolan. *Materials Today Communications*, 34, 105129.
- [10] Farid, S. A., & Zaheer, M. M. (2023). Production of new generation and sustainable concrete using rice husk ash (RHA): A review. *Materials Today : Proceedings*
- [11] Umasabor, R. I., & Okovido, J. O. (2018). Fire resistance evaluation of rice husk ash concrete. *Heliyon*, 4(12), e01035.
- [12] Syahida Adnan, Z., Ariffin, N. F., Syed Mohsin, S. M., & Abdul Shukor Lim, N. H. (2022). Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete. *Materials Today : Proceedings*, 48, 842-848.
- [13] Charitha, V., Athira, G., Bahurudeen, A., & Shekhar, S. (2022). Carbonation of alkali activated binders and comparison with the performance of ordinary portland cement and blended cement binders. *Journal of Building Engineering*, 53, 104513.
- [14] Elahi, M. M. A., Hossain, M. M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., & Shearer, C. (2020). A review on alkali-activated binders: Materials composition and fresh properties of concrete. *Construction & Building Materials*, 260, 119788.
- [15] Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymers materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283-314.
- [16] Castillo, Hengels & Collado, Humberto & Droguett, Thomas & Vesely, Mario & Garrido, Pamela & Palma, Sergio; (2022); State of the art of geopolymers: A review. *e-Polymers*; 22 108-124. 10.1515/epoly-2022-0015.
- [17] Lingyu, T., Dongpo, H., Jianing, Z., & Hongguang, W. (2021). Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 1-14.

- [18] Papadakis, V. G. (1999). Effect of fly ash on portland cement systems: Part I. low-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 29(11), 1727-1736.
- [19] Papadakis, V. G. (1999). Effect of fly ash on portland cement systems: Part II. low-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*.
- [20] Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*, 6, 100143.
- [21] Osman Gencil , Witold Brostow , Tea Datashvili & Michael Thedford (2011) Workability and Mechanical Performance of Steel Fiber-Reinforced Self-CoMPacting Concrete with Fly Ash, *Composite Interfaces*, 18:2, 169-184,
- [22] Gencil, O., Brostow, W., Datashvili, T., & Thedford, M. (2011). Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Composite Interfaces*, 18(2), 169-184.
- [23] Sathawane, S. H., Vairagade, V. S., & Kene, K. S. (2013). Combine effect of rice husk ash and fly ash on concrete by 30% cement replacement. *Procedia Engineering*, 51, 35-44.
- [24] Prakash, B., Saravanan, T. J., Kabeer, K. I. S., & Bisht, K. (2023). Exploring the potential of waste marble powder as a sustainable substitute to cement in cement-based composites: A review. *Construction & Building Materials*, 401, 132887.
- [25] Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Singh Sangwan, K., & Bhunia, D. (2017). A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*, 13, 87-95.
- [26] Singh, M., Srivastava, A., & Bhunia, D. (2017). An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. *Construction & Building Materials*, 134, 471-488.
- [27] Zhang, J., Guan, X., Wang, X., Ma, X., Li, Z., Xu, Z., & Jin, B. (2020). Microstructure and properties of sulfoaluminate cement-based grouting materials: Effect of calcium sulfate variety. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-8.
- [28] Santana-Carrillo, J., Burciaga-Díaz, O., & Escalante-Garcia, J. (2022). Blended limestone-portland cement binders enhanced by waste glass based and commercial sodium silicate - effect on properties and CO2 emissions. *Cement & Concrete Composites*, 126, 104364.
- [29] Murray, A., & Price, L. (2008). Use of alternative fuels in cement manufacture: Analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the chinese cement sector.
- [30] Moumin, G., Ryssel, M., Zhao, L., Markewitz, P., Sattler, C., Robinius, M., & Stolten, D. (2020). CO2 emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. *Renewable Energy*, 145, 1578-1596.
- [31] Rahman, A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Sharma, S. (2015). Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel (Guildford)*, 145, 84-99.

- [32] Hills, T., Leeson, D., Florin, N., & Fennell, P. (2016). Carbon capture in the cement industry: Technologies, progress, and retrofitting. *Environ.Sci.Technol*, 50(1), 368-377.
- [33] Cormos, C. (2022). Decarbonization options for cement production process: A techno-economic and environmental evaluation. *Fuel (Guildford)*, 320, 123907.
- [34] Qin, L., Zhu, S., Qin, P., Duan, L., Chen, W., Asamoah, E. N., & Han, J. (2023). A novel process of CO2 reduction coupled with municipal solid waste gasification by recycling flue gas during co-disposal in cement kilns. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(87), 33827-33838
- [35] Li, L., Liu, Q., Huang, T., & Peng, W. (2022). Mineralization and utilization of CO2 in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review
- [36] Tokareva, A., Kaassamani, S., & Waldmann, D. (2023). Fine demolition wastes as supplementary cementitious materials for CO2 reduced cement production. *Construction & Building Materials*
- [37] Zhang, Y., He, M., Wang, L., Yan, J., Ma, B., Zhu, X., Tsang, D. C. W. (2022). Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar*
- [38] He, M., Xu, Z., Sun, Y., Chan, P. S., Lui, I., & Tsang, D. C. W. (2021). Critical impacts of pyrolysis conditions and activation methods on application-oriented production of wood waste-derived biochar. *Bioresource Technology*
- [39] Norma ISO 14044:2006/A2
- [40] Cardim de Carvalho Filho, A. (2001). *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento-aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [41] Elvira Sabador Azorín (2013). *Cementos ecoeficientes basados en puzolanas alternativas procedentes de la industria cerámica*. Dirigida por. M^ª Isabel Sánchez de Rojas Gómez y Moisés Frías Rojas. Universidad Rey Juan Carlos
- [42] Norma UNE-EN 197-1:2011
- [43] Amran, M., Makul, N., Fediuk, R., Lee, Y. H., Vatin, N. I., Lee, Y. Y., & Mohammed, K. (2022). Global carbon recoverability experiences from the cement industry. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01439
- [44] ACI 201 Guía para la Durabilidad del Hormigón Informado por el Comité ACI 201 Robert C. O'Neill Presidente Russell L. Hill Secretario W. Barry Butler Joseph G. Cabrera* Ramon L. Carrasquillo William E. Ellis, Jr. Bernard Erlin Per Fidjestøl Stephen W. Forster Clifford Gordon Roy Harrell Harvey H. Haynes Eugene D. Hill, Jr. Charles J. Hookham R. Doug Hooton Allen J. Hulshizer Donald J. Janssen Roy H. Keck Mohammad S. Khan Paul Klieger* Joseph L. Lamond Cameron MacInnis Stella L. Marusin Bryant Mather Mohamad A. nagi Robert E. Neal Charles K. Nmai William F. Perenchio Robert E. Price* Jan R. Prusinski Hannah C. Schell James W. Schmitt Charles F. Scholer Jan P. Skalny Meter Smith George W. Teodoru Niels Thaulow Michael D. Thomas J. Derle Thorpe Paul J. Tikalsky Claude B. Trusty David A. Whiting* J. Craig Williams Yoga V. Yogendran
- [45] Código estructural capítulo 9 Real Decreto 470/2021 ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana. BOE núm. 190, de 10 de agosto de 2021, páginas 97664 a 99452 (1789 págs.)