



KUDEAKETAREN ETA INFORMAZIO SISTEMEN  
INFORMATIKAREN INGENIARITZAKO GRADUA

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## ***CEMENTOS ALTERNATIVOS AL CEMENTO PORTLAND***



**Estudiante:** Navarro Ferrer, Francisco

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS**

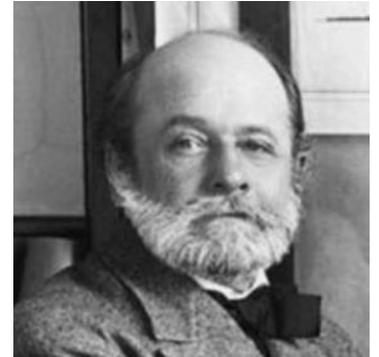
**Tutor:** Arias Ergueta, Pedro Luis

**Departamento:** Ingeniería Química y del Medio Ambiente



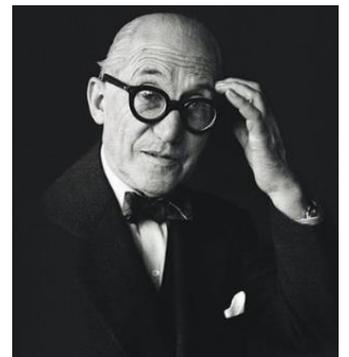
***“La construcción es la lengua materna del arquitecto; un arquitecto es un poeta que piensa y habla en el idioma de la construcción”***

***Auguste Perret***



***“La veracidad de los materiales de construcción: hormigón, ladrillos y piedra, se mantendrán en todos los edificios construidos o que se construirán”***

***Le Corbusier***



## AGRADECIMIENTOS

\*\*\*\*\*

A mi tutor, Pedro Luis Arias, por su dedicación, ayuda, tiempo y consejos a lo largo de este proyecto.

A mi padre, por tus consejos, experiencia y confianza. También por acompañarme en este camino.

A mi madre, por tu apoyo, por animarme cuando más lo necesito, por estar siempre ahí sin pedir nada a cambio, por comprenderme, por ser como eres.

A muchos de los profesores de la Universidad de la UPV/EHU de Bilbao del máster de ingeniería de materiales avanzados como José Tomás San-José Lombera por sus grandes conocimientos y tiempo dedicado en sus alumnos.

Por último, a mis abuelos. Vosotros sois una gran referencia que me ayuda a mejorar y crecer como persona cada día.

\*\*\*\*\*

## ÍNDICE

1.- RESUMEN.....	6
2.- INTRODUCCIÓN.....	7
3.- OBJETIVO.....	8
4.- HISTORIA.....	9
5.- COMPUESTOS DEL CLÍNKER Y MATERIAS PRIMAS .....	10
6.- HIDRATACIÓN DE LOS CEMENTOS .....	13
7.- TIPOS DE CEMENTO .....	14
8.- PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y FABRICACIÓN .....	15
8.1.- Obtención del cemento.....	15
9.- IMPACTO AMBIENTAL .....	18
9.1.- Estimación de las emisiones de CO <sub>2</sub> y su impacto ambiental .....	18
9.2.- Cálculo de emisiones .....	21
10.- DIVERSAS ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA UTILIZACIÓN DE CP.....	24
10.1.- Materiales suplementarios.....	24
10.2.- Cemento de sulfoaluminatocálcico o cemento belítico (CSA) .....	27
10.3.- Cemento supersulfatado (CSS) .....	29
10.4.- <i>Green cements</i> .....	30
10.5.- LC <sup>3</sup> .....	31
10.6.- Ceniza de bagazo de caña de azúcar.....	33
10.7.- Geopolímero.....	34
10.8.- Cemento con residuos cerámicos.....	37
11.- COMPARACIÓN ENTRE CPO Y CSA.....	39
11.1.- Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> cuantificadas entre CPO y CSA .....	39
11.2.- Comparación de las composiciones entre clinker de CPO y CSA .....	40
12.- SOLUCIONES .....	40
13.- CONCLUSIONES .....	42
14.- PRÓXIMOS TRABAJOS FUTUROS.....	43
15.- BIBLIOGRAFÍA.....	44

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Diagrama de Gantt.....	7
Ilustración 2 Pirámides de Giza en el antiguo Egipto contruidos a base de morteros de calizas y yeso disueltos en agua.....	9
Ilustración 3 Coliseo Romano o Anfiteatro flavio .....	10
Ilustración 4 Diagrama de flujo del proceso de producción del cemento portland [8].....	16
Ilustración 5 Microscopía del clínker [9].....	17
Ilustración 6 Diagrama de barras sobre el consumo y producción de cemento y PBI del mundo 2006-2018 [10].....	18
Ilustración 7 Gráfico circular sobre diferentes emisiones en la producción del clínker .....	19
Ilustración 8 Energía consumida de la producción de cemento portland, fuentes de emisión de CO <sub>2</sub> [13] 22	
Ilustración 9 Diagrama de barras entre la resistencia a compresión y el tiempo a 90 días del CPO y el LC <sup>3</sup> [20].....	32
Ilustración 10 Resistencia a compresión de cemento con diferentes porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azucar en función del tiempo [22] .....	33
Ilustración 11 Hormigón con cenizas de bagazo de caña de azúcar .....	34
Ilustración 12 Red sialato del geopolímero [23].....	35
Ilustración 13 Clasificación de materiales alcalinos activados [23] .....	36
Ilustración 14 Piezas de cerámica.....	38
Ilustración 15 Polvo de cerámica.....	38
Ilustración 16 Resistencias a compresión a 1, 3, 7, 28 días de fraguado con 0%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15% de residuos cerámicos [25] .....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes principales del cemento, fases minerales (compuestos) del clínker [3].....	10
Tabla 2 Materias primas: Principales (crudo) y secundarios [5].....	12
Tabla 3 Tipos de cemento según la "UNE-EN 197-1:2000" [6].....	14
Tabla 4 Toneladas métrica de producción del clínker [11].....	19
Tabla 5 Factores de emisión desde 1990 hasta 2020 [11] .....	20
Tabla 6 Composiciones químicas de algunos SMC [14].....	24
Tabla 7 Diferentes porcentajes de cenizas volantes y sus repercusiones tóxicas [14] .....	26
Tabla 8 Características con diferentes SMC [15] .....	26
Tabla 9 Comparación entre cemento portland ordinario y sulfoaluminato de calcio [16].....	27
Tabla 10 Tipos de cementos de sulfoaluminato (CSA) y sus componentes [17].....	28
Tabla 11 Comparación entre LC <sup>3</sup> y cemento portland [21] .....	33

# ALTERNATIVAS AL CEMENTO PORTLAND

**Nomenclatura** del cemento a lo largo del documento: CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, s=SO<sub>3</sub>, S= SiO<sub>2</sub> y H=H<sub>2</sub>O.

**Palabras clave:** Cemento portland, clínker, mortero, fraguado, hidratación y dióxido de carbono.

## 1.- RESUMEN

Este proyecto se desarrolla en el ámbito de la ingeniería de materiales y tiene por objetivo su presentación como Trabajo de Fin de Máster en la Universidad del País Vasco UPV/EHU, Escuela de Ingeniería de Bilbao (EIB).

A lo largo del trabajo que se recoge en la presente memoria, se ha estudiado la posibilidad de encontrar distintas soluciones para el problema de utilizar materias primas convencionales para la producción de cemento y poder encontrar alternativas para reducir el coste de producción, así como, las correspondientes emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente. Se intenta buscar una nueva tecnología para incrementar la sostenibilidad de la industria del cemento.

Una amplia revisión bibliográfica ha permitido encontrar algunas alternativas al cemento portland y se han estudiado características de las más prometedoras para poder garantizar unas prestaciones adecuadas con un menor impacto en el medio ambiente.

Para organizar y gestionar mejor el proyecto, en relación, al período estimado de entrega, se ha procedido a ilustrar mediante un diagrama de Gantt los diversos pasos que se han llevado a cabo y en cuanto tiempo se ha realizado cada tarea.

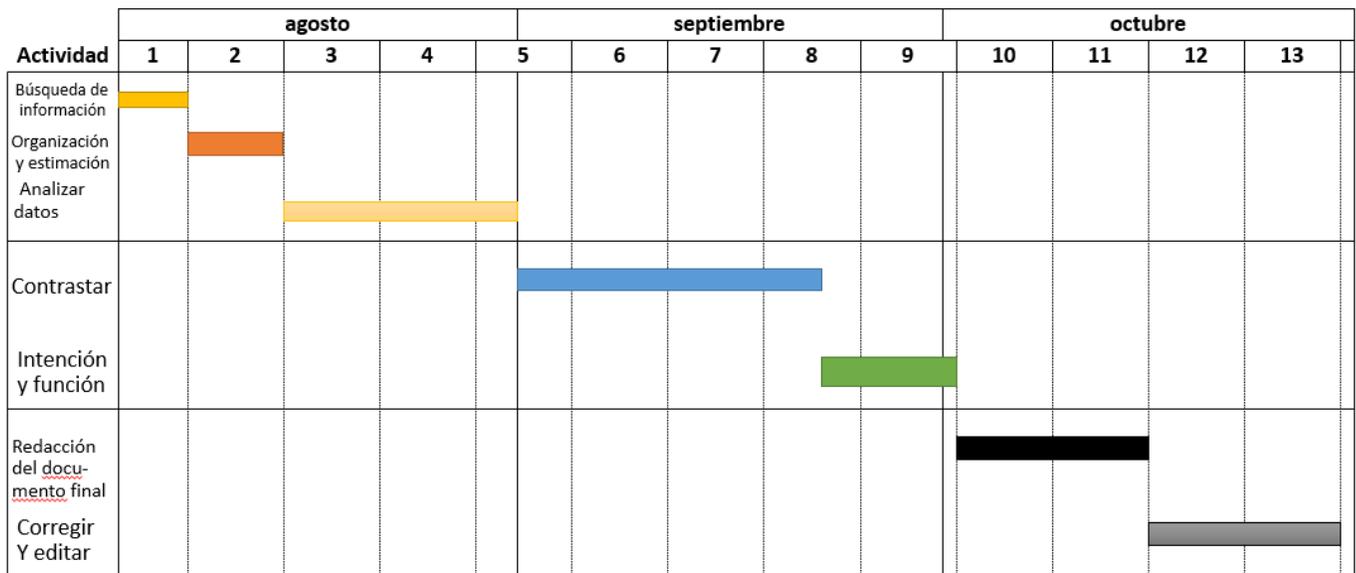


Ilustración 1 Diagrama de Gantt

## 2..- INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las estructuras que rodean al ser humano, hoy en día, no están construidas con materiales neutros para el medio ambiente, ya que su fabricación o su aplicación afectan negativamente generando un fuerte impacto ambiental.

El material de construcción por excelencia para ciudades urbanizadas y asentamientos humanos es el cemento. El cemento es un material en el que se utilizan conglomerantes hidráulicos, materiales artificiales de naturaleza inorgánica y minera, que finalmente molidos y convenientemente amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen gracias a las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus componentes, acarreando productos hidratados mecánicamente resistentes, duraderos y estables, tanto a las condiciones externas como el aire como debajo del agua.

Los tipos de cemento varían según las propiedades y prestaciones mecánicas que aportan y según su denominación (tipo I, tipo II, etc..). Existen diferentes formas de fabricar cemento y todas ellas tienen partes comunes y la principal diferencia es que en dos de ellas se utiliza agua y en las otros dos no. Las formas de producir cemento se conocen como vía húmeda, vía semihúmeda, vía seca y vía semiseca. Las fases son la extracción de materiales, la molienda de los materiales, la prehomogeneización y la homogeneización y finalmente la elaboración del clínker [1].

Es conveniente estudiar otras alternativas ya que el cemento portland ordinario (CPO) presenta algunos inconvenientes, como son: destrucción del paisaje, contaminación atmosférica (emisiones de CO<sub>2</sub>, emisiones de partículas sólidas), vibraciones del suelo, contaminación del agua, residuos y ruido.

### 3.- OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es el estudio de la sustitución parcial o total de las materias primas convencionales por otros materiales o residuos en la producción de cemento para conseguir un material de construcción más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, ya que la producción de cemento convencional es la responsable de entre el 5 y el 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> (este constituyente del 65% de los gases de efecto invernadero emitidos).

El sector industrial, incluido el de la construcción, debe afrontar con urgencia la resolución de un elenco de problemas importantes:

- Aumento de la demanda anual de recursos naturales: La industria de la construcción engloba entre un 40% y 75% de los materiales vírgenes que se extraen como principal combustible fósil.
- Calidad y disponibilidad de los materiales convencionales: Toda materia prima utilizada en cualquier proceso de producción se va agotando al reducirse los recursos disponibles para dicha elaboración, lo que provoca una producción cada vez más incierta. El uso de materiales reciclados ayudaría a preservar los materiales vírgenes (no renovables) por naturaleza, aunque su uso puede generar problemas de calidad. Hay que ver si su utilización es rentable, teniendo en cuenta las condiciones de resistencia y durabilidad.
- Eliminación de desechos: Los residuos aumentan conforme la tasa urbanística crece y estos elementos pueden contener componentes tóxicos para la salud, por lo que, muchas veces necesitan procesos secundarios para poder volver a introducir estos elementos en la cadena productiva y conseguir alargar el ciclo de vida útil del material.
- En última instancia la sostenibilidad: Introducir una nueva gestión activa de los residuos para tener como finalidad reducir los residuos que van a los vertederos. Cada vez es más difícil gestionar la localización y más costoso su mantenimiento.
- Las nuevas consideraciones de economía circular y las normas ambientales correspondientes hacen necesario desarrollar nuevos materiales sostenibles en la industria de la construcción a través del reciclaje.

## 4.- HISTORIA

En la evolución de la humanidad hubo un punto de inflexión en el cual los seres humanos dejaron de lado los asentamientos en cavernas y pasaron a utilizar morteros básicos basados en calizas y yeso en disoluciones acuosas y dieron paso al comienzo de la era de lo que sería después el cemento portland.

El hombre comenzó a utilizar pastas desarrolladas a partir de yeso, cal y arcilla, pero no cumplían con unas propiedades mecánicas considerables y se degradaban fácilmente con las condiciones meteorológicas adversas. Fue entonces cuando se empezó a introducir en la mezcla agua con minerales molidos para llegar a una especie de pasta que obtuvo resistencia a la rápida degradación y aportó mayor estabilidad a las estructuras construidas en la antigüedad. Claro ejemplo se puede ver en Egipto donde unieron grandes bloques de piedra con este tipo de componentes (alrededor del 2750 a.C.).



*Ilustración 2 Pirámides de Giza en el antiguo Egipto construidos a base de morteros de calizas y yeso disueltos en agua*

Más tarde, en el año 500 a.C, los griegos realizaron un gran estudio en profundidad de ensayo y error basado en la utilización de productos volcánicos con arena, caliza y agua. Este mortero tenía mejores prestaciones que los utilizados en el antiguo Egipto.

Posteriormente, en el siglo II a.C surgió la puzolana (región de Puzzoli, Nápoles) que es un material silíceo o aluminosilíceo. Mezclada con cal se produce el cemento puzolánico de mayores prestaciones en comparación con la de los griegos y egipcios debido a su alta durabilidad y mayor resistencia.

Alguna obra de gran relevancia es el Coliseo Romano que se puede examinar en la ilustración 3:



*Ilustración 3 Coliseo Romano o Anfiteatro flavio*

En el siglo XVIII, el británico James Parker creó el primer cemento portland logrado a partir de carbón y caliza arcillosa calcinados a alta temperatura. Se denomina Portland porque su color gris es muy parecido al de la piedra de una isla llamada con este mismo nombre de la región inglesa. Fue en 1845 cuando Isaac Johnson optimizó el proceso de producción incrementando el gradiente de temperaturas en la calcinación y surgiendo el material que hoy se conoce como clínker. Por lo que Johnson rediseñó el proceso para crear el cemento Portland que hoy se conoce y se emplea en multitud de aplicaciones como puentes, estructuras y viviendas [2].

## 5.- COMPUESTOS DEL CLÍNKER Y MATERIAS PRIMAS

Los silicatos son una materia prima importante debido al alto porcentaje que se le atribuye en su composición del cemento, ya que suman entre el 60 y el 80 por ciento de la totalidad y son los responsables de altas prestaciones como las resistencias mecánicas del material. Estos componentes principales son los que se transforman en el horno al introducir el crudo.

*Tabla 1 Componentes principales del cemento, fases minerales (compuestos) del clínker [3]*

Nombre	Composición	Fórmula abreviada	Nombre del mineral
Silicato tricálcico	3 CaO, SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	Alita
Silicato bicálcico	2 CaO, SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	Belita
Aluminato tricálcico	3 CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	- (Aluminato)
Ferrito aluminato tetracálcico	4 CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	Celita ó Ferrita

**La alita:** Constituye entre el 50% y el 70% (porcentaje en peso) del clínker. Se hidrata y endurece más rápido que la belita. Es responsable del inicio del fraguado. Cuanto mayor porcentaje de alita mayor resistencia posee el cemento. Aporta resistencia a corto y largo plazo.

**La belita:** Constituye entre el 15% y el 30% del clínker. Se hidrata y endurece lentamente, al contrario que la alita. Contribuye al incremento de la resistencia a un plazo mayor de 7 días. Libera muy poca cantidad de calor de hidratación (62 cal/g).

**El C<sub>3</sub>A:** El clínker contiene entre un 5% y un 10% de este compuesto. Libera mucha cantidad de calor (207 cal/g) durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. Es vulnerable a la acción de los sulfatos. Forman producto expansivo (etringita). Contribuye en el desarrollo de resistencias prematuras y en el fraguado del cemento.

**La celita:** Constituye entre el 5% y el 15% del clínker. Se hidrata con rapidez, pero contribuye muy poco a la resistencia, en contraste con la alita, la belita y el C<sub>3</sub>A. Su formación reduce la temperatura de clinkerización. [3]

De estos cuatro componentes existen varias formulaciones según la aplicación prevista para un cemento, para saber como dosificarlos o repartirlos en la elaboración del clínker y, entre todas ellas, Robert Herman el que hizo un excelente trabajo al estimar las cantidades óptimas tras un largo período de análisis.

Robert Herman Bogue fue un químico y físico estadounidense que consiguió el cargo de director de la empresa denominada Portland Cement Association (PCA). A partir de un análisis químico estudió las proporciones de las composiciones del clínker y concluyó, a través de una fórmula, las cantidades de los compuestos principales del clínker [4]. En las siguientes ecuaciones se pueden ver las cantidades adecuadas de cada compuesto.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_3S = (4,071 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (6,718 \times \% Al_2O_3) - (1,430 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3) \\ C_2S = (2,867 \times \% SiO_2) - (0,754 \times \% C_3S) \\ C_3A = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3) \\ C_4AF = 3,043 \times \% Fe_2O_3 \end{array} \right.$$

Para entender de una forma más clara las composiciones del cemento se incluye la tabla 2, en la que se reseñan las composiciones y denominaciones de las materias primas que se utilizan existen dentro del campo del cemento convencional, aunque luego haya diferentes tipos que varíen su dosificación.

Tabla 2 Materias primas: Principales (crudo) y secundarios [5]

	Formulación	Fórmula abreviada	Origen	Rango (% en masa)	Media (% en masa)	Características
Óxido cálcico (cal)	CaO	C	Caliza (Carbonato cálcico)	80-87	85	Carácter básico, componente activo
Anhídrido silíceo (sílice)	SiO <sub>2</sub>	S	Arcillas	17-25	21	Carácter ácido, componente activo
Óxido aluminico (alúmina)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	Arcillas	3-8	8	Carácter ácido, fundente
Óxido férrico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	Arcillas	0,5-6	3	Carácter ácido, fundente
Álcalis	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	K+N	Caliza o arcilla			
Trióxido de azufre (sulfatos)	SO <sub>3</sub>	S	Yeso (regula el fraguado)			
Óxido de magnesio (magnesia)	MgO	M	Caliza o arcilla	2		
Óxido manganeso	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn				
Óxido de titanio	TiO <sub>2</sub>	T				
Óxido de cromo	CrO	Cr				
Óxido de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P				
Óxido de bario	BaO	Ba				

Óxido de estroncio	SrO	Sr				
Agua	H <sub>2</sub> O	H	Arcillas			

## 6.- HIDRATACIÓN DE LOS CEMENTOS

Un fenómeno que resulta importante entender que el proceso de hidratación de un cemento es un proceso exotérmico. Se denomina calor de hidratación a la cantidad de calor medida frecuentemente en cal/g que se genera cuando se mezcla cemento pulverizado con agua para transformarse en un agente aglomerante gracias a procesos químicos responsables de la creación de los nuevos compuestos, que se citan en la tabla 1.

Factores que influyen en la hidratación:

- Adiciones del cemento
- Temperatura de la pasta
- Relación agua/cemento
- Tamaño de los granos del cemento. La hidratación no se produce de forma total, sino que, pasado aproximadamente 90 días, las partículas que son mayores de 50 micras no logran hidratarse por completo

Las temperaturas altas que genera la hidratación pueden influir en el agrietamiento térmico y en unas propiedades mecánicas inferiores a las deseadas. El incremento de la temperatura de curado aumenta el calor de hidratación, pero también la disminución del tamaño de partícula y el contenido en cemento pueden aumentar el calor de hidratación.

Cuando endurece el cemento hidráulico, los silicatos cálcicos y los aluminatos se hidratan y se forma una masa rígida a causa de reacciones químicas como la hidrólisis (formación de hidróxido de calcio). Después de que los compuestos principales se han hidratado se vuelven estables y por esa razón, el cemento que ha endurecido con el tiempo se vuelve insoluble en el agua.

Cada una de las 4 fases del cemento (alita, belita, aluminato tricálcico y aluminoferrita tricálcica) tienen sus períodos y mecanismos de hidratación. Como la belita forma parte de entre un 50% y 70% de la masa del cemento portland tiene bastante repercusión en el fraguado y endurecimiento de la mezcla final. Se consideran 4 etapas

**Etapa 1:** Se produce una disolución rápida de las partículas del cemento con el contacto de las proporciones de agua estimadas con antelación.

**Etapa 2:** Formación de una capa fina de hidrato de silicato cálcico (C-S-H) sobre la superficie externa de la alita.

**Etapa 3:** La pasta de cemento modifica su aspecto pasando de un estado plástico a sólido. En esta etapa se acelera el proceso de hidratación de alita a C-S-H e hidróxido de calcio (portlandita).

**Etapa 4:** Reducción de la tasa de hidratación debido a las interferencias entre capas de C-S-H. La reacción primaria de hidratación de la alita es la siguiente:



La hidratación de  $\text{C}_3\text{A}$  con yeso produce etringita (hidrato de trisulfato de aluminato tricálcico,  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{Cs} \cdot 32\text{H}$  ó AFt) e hidratos de monosulfoaluminoferrita ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$  ó AFm).

La hidratación de los dos silicatos, la belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ) y la alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) produce tobermoritas ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ) y la portlandita (CH). Las tobermoritas (formaciones fibrosas) aportan durabilidad y la portlandita protege de la corrosión porque posee un alto nivel alcalino en el cual el pH = 12,5.

## 7.- TIPOS DE CEMENTO

Existen diferentes normas en el mundo para la clasificación de los cementos y según la UNE-EN 197-1:2000 (norma española) se clasifican en función de las propiedades que garantizan. En la tabla se trata de representar el tipo, la denominación de cada uno y la designación de los más comúnmente utilizados y recogidos en la norma española.

Tabla 3 Tipos de cemento según la "UNE-EN 197-1:2000" [6]

Tipos de cementos	Denominaciones	Designaciones
I	Cemento portland	CEM I
II	Cemento portland con adiciones	CEM II
III	Cemento de horno alto	CEM III
IV	Cemento puzolánico	CEM IV
V	Cemento compuesto	CEM V

El tipo I sería la combinación de clínker y yeso con una composición máxima de caliza del 5%, se utilizan en obras que no requieren propiedades especiales. El tipo II es una mezcla entre clínker y el yeso, pero con adición mineral y se utilizan cuando se requiere una moderada resistencia a sulfatos y calor de hidratación. Algunas de estas adiciones minerales pueden ser puzolanas, escorias de alto horno y cargas.

En el tipo III se emplea cuando se necesita una alta resistencia inicial. En el tipo IV se caracteriza por bajo calor de hidratación. Y el tipo V, posee una alta resistencia a sulfatos. Dependiendo en qué lugares se vayan a utilizar este tipo de cementos, se estudian las características de cada tipo de ellos y se decide por sus mejores prestaciones.

## 8.- PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y FABRICACIÓN

El cemento por sí solo está formado por conglomerantes de caliza y arcilla que endurecen con el contacto con el agua. Al conjunto entre cemento y H<sub>2</sub>O recibe el nombre de lechada. Si a la lechada se le añaden finos (arena de diámetros menores a 0,063 mm) se forma la pasta de cemento. Y la pasta adicionada con arena forma el mortero. El mortero agregado a árido más grueso (diámetros mayores a 5 mm) es lo que recibe el nombre de hormigón. El componente más relevante del hormigón, de entre los áridos, es la arena. Los áridos se producen en canteras cercanas y no suelen transportarse a largas distancias para conseguir abaratar el coste final de la obtención de las materias primas.

### 8.1.- OBTENCIÓN DEL CEMENTO

El cemento se obtiene mediante un proceso de descarbonatación al que le sigue el de clinkerización, donde se calcina la piedra caliza que está formada principalmente por carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) a unos 900°C con el objetivo de generar óxido de calcio o cal (CaO), liberando CO<sub>2</sub> en el proceso. En el horno, la cal reacciona a temperaturas del orden de 1450°C con sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), y óxidos de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), para producir aluminatos, silicatos y ferritas de calcio, que son los principales constituyentes del Clinker [7].

El proceso de descarbonatación tiene lugar en una torre pre calentadora donde se introduce el crudo y la reacción química que se lleva a cabo es la siguiente:



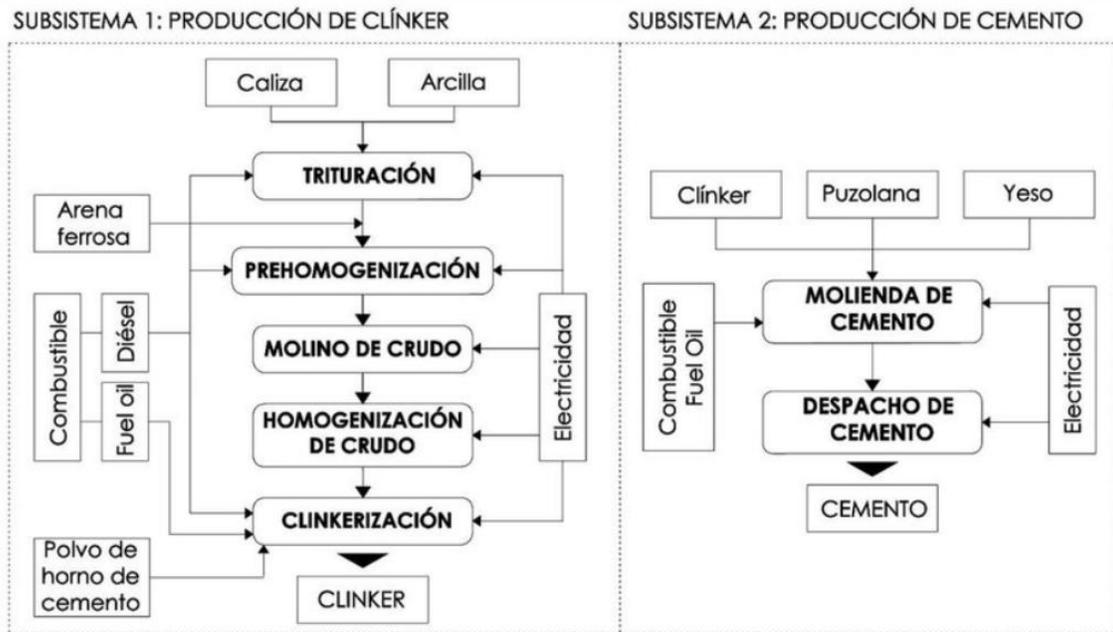


Ilustración 4 Diagrama de flujo del proceso de producción del cemento portland [8]

En la ilustración 4 mostrada anteriormente, se puede observar los 5 procesos que se ven involucrados en la producción del clinker que son los siguientes que se van a describir a continuación:

1. **Trituración:** En este paso se dividen las rocas de arcilla y caliza a través de una trituradora convencional.
2. **Prehomogenización:** Es un desarrollo semiautomático donde se amontonan los materiales triturados para trasladarlos hasta las tolvas de dosificación del molino del crudo.
3. **Molienda de crudo:** La caliza conseguida se distribuye con calizas de alta pureza, arena ferrosa y arcilla. En el transcurso del molino se alcanzan temperaturas de 320°C y la caliza se seca en un circuito cerrado.
4. **Homogenización del crudo:** Se combinan harina cruda hasta lograr un material homogéneo con la ayuda de aire comprimido. Este sistema posee dos depósitos, uno para la homogenización y otro para la admisión del producto de molienda.
5. **Clinkerización:** La harina cruda se manipula en el horno y se examina por medio de un sistema automático que estabiliza la temperatura a un máximo de 1450°C para adquirir una producción uniforme.

En este último proceso existen varias etapas, el crudo va experimentando diferentes cambios para poder obtener un producto final con unas propiedades determinadas:

**1ª etapa:** A 700°C el agua que poseen las arcillas y calizas se va evaporando. Es ahí cuando empieza la separación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en óxido de calcio (cal libre) y anhídrido carbónico (calcinación).

**2ª etapa:** 700°C – 900°C prosigue el proceso de calcinación, aumentando la cantidad de cal libre, aproximadamente a 850°C. A partir de este punto, empieza a ocurrir la formación de aluminatos y ferritos.

**3ª etapa:** 900°C – 1200°C la sílice reactiva inicia el proceso de mezclado con la cal para formar el  $\text{C}_2\text{S}$ . Entre 1150°C – 1200°C se completa la calcinación y la temperatura empieza a ascender velozmente.

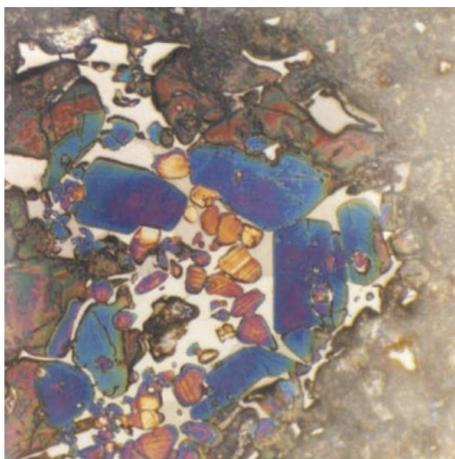
**4ª etapa:** 1200°C – 1350°C: Cuando supera los 1250°C se forma la fase líquida y aparece la reacción de belita ( $\text{C}_2\text{S}$  y cal libre para formar alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ).

**5ª etapa:** 1350°C – 1500°C: Los cristales de belita reducen la cantidad, pero incrementan el tamaño. En cambio, los cristales de alita crecen en tamaño y número.

**6ª etapa:** Enfriamiento: En esta etapa cristaliza el aluminato tricálcico y el ferroaluminatotetracálcico

Mediante una técnica de decoloración utilizada se pueden distinguir cuatro minerales diferentes en el proceso de clinkerización, en la ilustración 5 se muestra esta morfología.

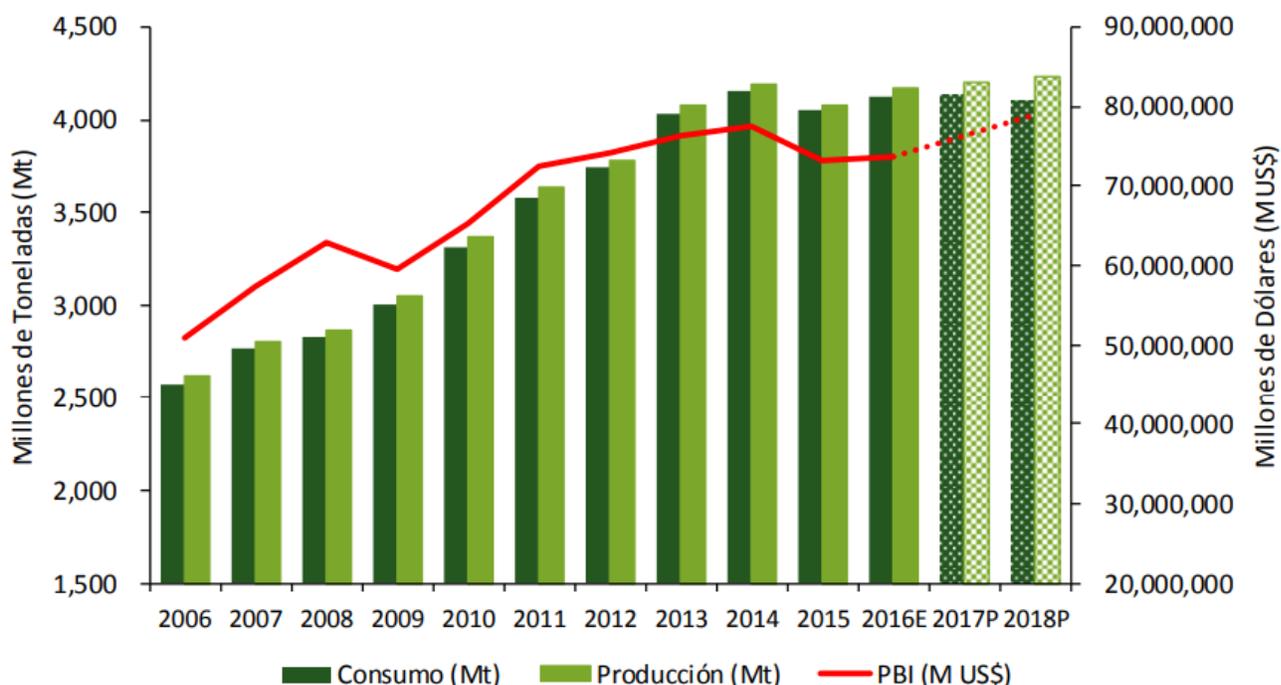
- Cristales marrones:  $\text{C}_3\text{S}$
- Cristales azules:  $\text{C}_2\text{S}$
- Cristales grises:  $\text{C}_3\text{A}$
- Cristales blancos:  $\text{C}_4\text{AF}$  [9].



*Ilustración 5 Microscopía del clínker [9]*

## 9.- IMPACTO AMBIENTAL

El consumo de cemento está fuertemente ligado a su uso en la edificación y, por consiguiente, el crecimiento de la tasa de urbanización permite estimar un crecimiento del consumo de este producto. En el siguiente gráfico, se puede ver la tendencia del consumo mundial de cemento, aunque hay que remarcar que China es la potencia más fuerte que lidera en este sector, controlando aproximadamente un 60% de la producción mundial de este material.



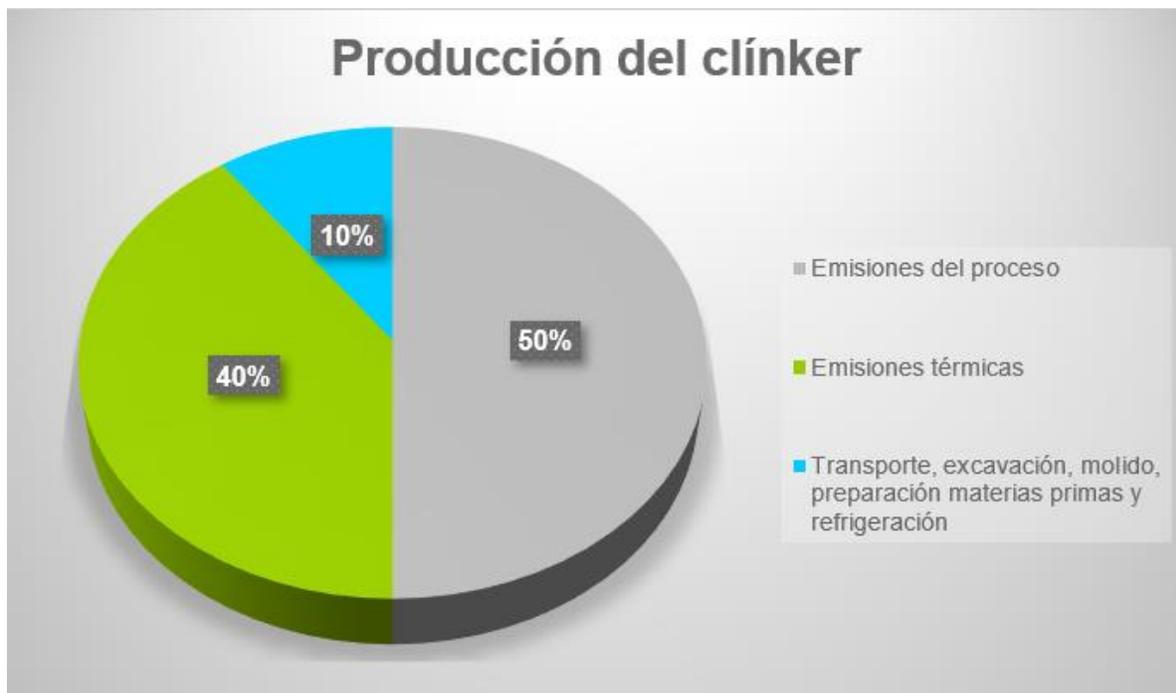
Fuente: Internacional Cement Review, Banco Mundial y FMI

Elaboración: ASOCEM

Ilustración 6 Diagrama de barras sobre el consumo y producción de cemento y PIB del mundo 2006-2018 [10]

### 9.1.- Estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> y su impacto ambiental

En primer lugar, se acude a datos tabulados [11] que informan sobre las toneladas de clínker producidas cada año porque la fabricación del clínker supone la mayor generación de CO<sub>2</sub> en el proceso de producción del cemento, aproximadamente el 90% (emisiones térmicas y emisiones del proceso), por ello, el cálculo sobre las emisiones se hace en referencia a este proceso para poder cuantificar el daño causado al planeta.



*Ilustración 7 Gráfico circular sobre diferentes emisiones en la producción del clínker*

A continuación, se muestra en la tabla 3 los datos desde 1990 en toneladas métricas sobre la producción del clínker:

*Tabla 4 Toneladas métrica de producción del clínker [11]*

<b>Año</b>	<b>Producción del clínker (t)</b>
1990	23.211.731
1991	22.118.675
1992	19.732.165
1993	18.740.185
1994	21.737.227
1995	23.373.454
1996	22.900.967
1997	24.104.979
1998	26.103.860
1999	27.280.915
2000	27.840.499
2001	28.382.550
2002	29.357.596

2003	30.316.646
2004	30.798.002
2005	31.742.484
2006	32.078.063
2007	32.045.543
2008	27.304.551
2009	21.594.604
2010	21.207.202
2011	18.242.700
2012	16.718.983
2013	14.649.827
2014	16.950.910
2015	17.649.533
2019	17.511.432
2020	15.653.277

Los factores de emisión son herramientas que logran estimar una cierta cantidad de emisiones de un determinado contaminante (CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) durante una actividad o conjunto de procesos concretos. En esta parte se puede ver que sus unidades vienen indicadas en kg/t.

Se debe toma un factor de emisión disponible en la tabla 4 y se utiliza en la fórmula que se detalla posteriormente.

*Tabla 5 Factores de emisión desde 1990 hasta 2020 [11]*

<b>Año</b>	<b>Kg CO<sub>2</sub>/t clínker</b>
1990	529
1991	529
1992	529
1993	529
1994	529
1995	529
1996	529
1997	529
1998	529

1999	529
2000	529
2001	529
2002	529
2003	529
2004	529
2005	529
2006	522
2007	525
2008	527
2009	528
2010	528
2011	522
2012	524
2013	522
2014	525
2015	522
2016	523
2017	527
2018	524
2019	518
2020	523

## 9.2.- Cálculo de emisiones

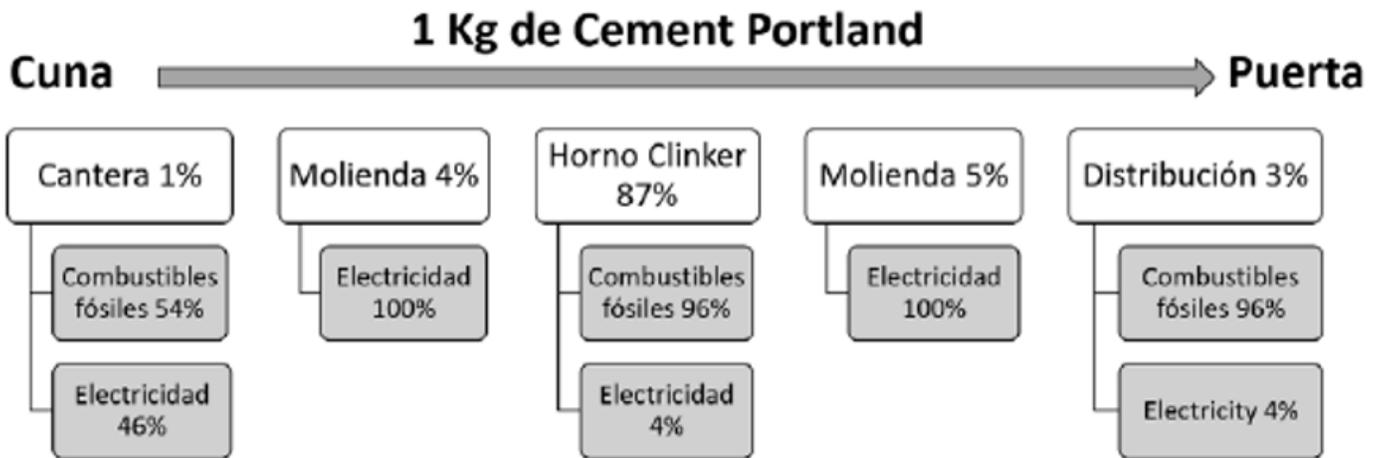
Emisiones de CO<sub>2</sub> (kt) = Producción de clínker (t) \* Factor de emisión [12], sabiendo que:

1 kilotonelada (kt) = 1.000.000 kilogramo (kg)

Se pueden hallar las emisiones de CO<sub>2</sub> para cualquier año que se requiera. Por ejemplo, en el año 2020:

Emisiones de CO<sub>2</sub> 2020 (kt) = 15.653.277 \* 523/1.000.000 = 8.186,66387 kt de CO<sub>2</sub> del clínker

Para entender mejor los diferentes parámetros que afectan al medio ambiente al fabricar un kilogramo de cemento convencional se refleja el siguiente esquema (ilustración 8) donde se puede apreciar desglosadamente cada proceso y la energía que se consume.



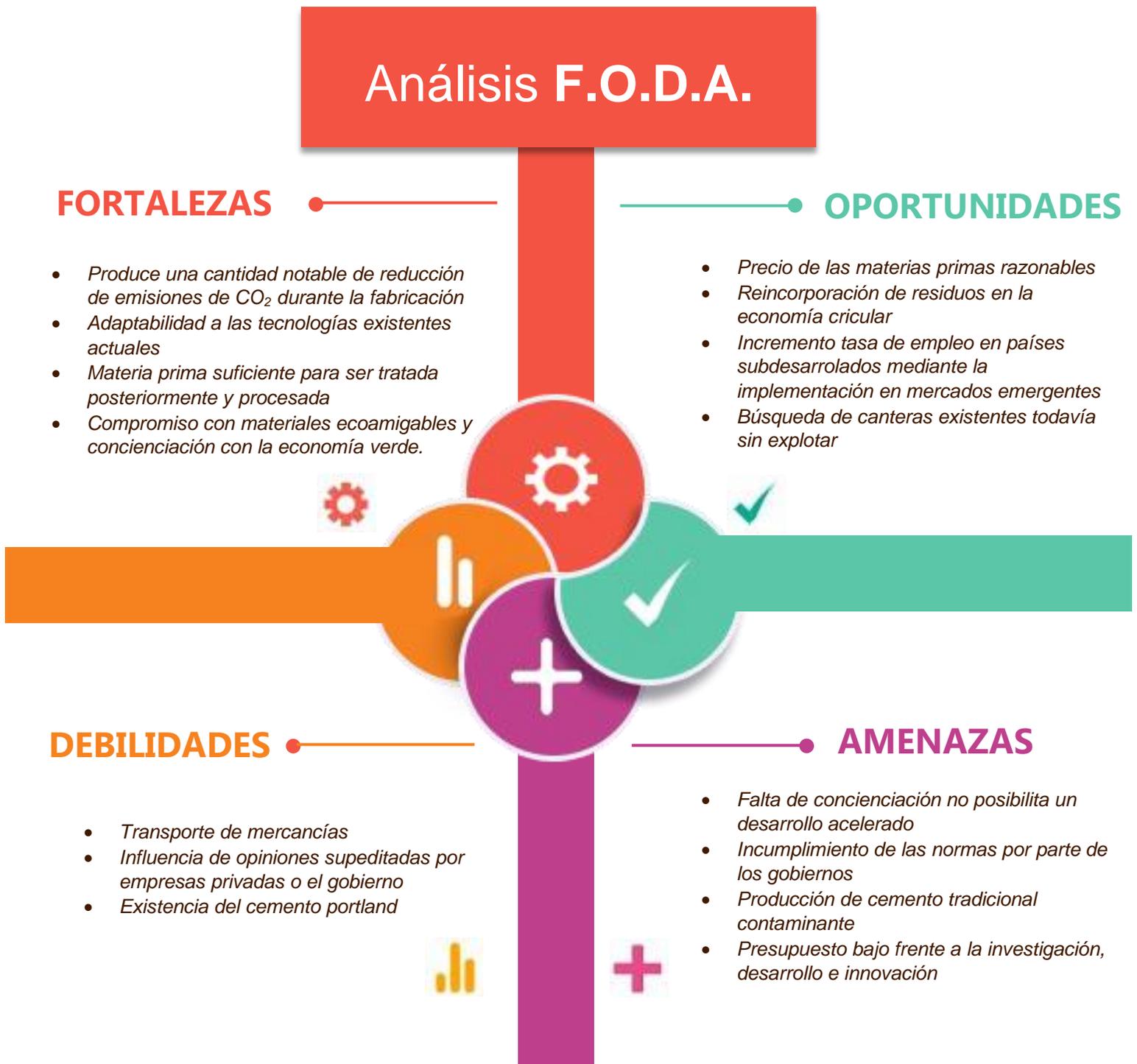
*Ilustración 8 Energía consumida de la producción de cemento portland, fuentes de emisión de CO<sub>2</sub> [13]*

Se establece este análisis para reflejar la importancia de la energía embebida existente desde la obtención de las materias primas (cuna) hasta el instante en que el producto terminado se expide de la fábrica (puerta).

Cabe remarcar, que la electricidad para utilizar la maquinaria responsable de la molienda, la extracción en las canteras y el procesamiento de los combustibles fósiles son procesos que consumen una gran cantidad de energía, pero el factor crítico es a la hora de calentar en el horno las materias primas.

A partir de este punto, una vez explicados unos conocimientos básicos sobre el cemento, se va a tratar de informar sobre diferentes tipos de cementos ecológicos y sus características principales para poder tener un amplio abanico de alternativas convencionales o de vanguardia y conseguir confrontar varios conceptos para esclarecer algunas opciones posibles ante la problemática actual sobre el impacto ambiental del cemento portland.

Se introduce una herramienta de análisis de estudio para ver brevemente las características internas de los materiales propuestos a lo largo del proyecto sobre los cementos verdes.



## 10.- DIVERSAS ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA UTILIZACIÓN DE CP

A continuación, se analizan diferentes materiales para poder sustituir parcialmente el CP y reducir el impacto ambiental. Se trata de contemplar las ventajas estructurales que poseen los cementos y materiales suplementarios cuando se dosifican con otros aditivos para poder otras alternativas y emitir menores cantidades de CO<sub>2</sub>.

### 10.1.- Materiales suplementarios

Los materiales suplementarios (SMC) son materiales inorgánicos que colaboran en las prestaciones de una mezcla cementicia mediante actividad hidráulica, puzolánica o ambas. Las puzolanas son sustitutivos del cemento. Son mezclas silíceas que se pueden encontrar con contenidos aluminosos. Cualquier material cementante, sólo o junto otros materiales suele formar hidratos de silicato de calcio (C-S-H), hidratos de aluminosilicatos (A-S-H) o hidratos de aluminosilicatos de calcio (C-A-S-H). Existen algunos tipos de SMC como pueden ser cenizas volantes (FA, Fly Ash), escoria granulada de alto horno (GGBS, Ground Granulated Blast Furnace Slag), humo de sílice (SF, Silica Fume), metacaolín, ceniza de cascarilla de arroz (RHA, Rusk Husk Ash), ceniza combustible de aceite de palma (POFA, Palm Oil Fuel Ash), ceniza de mazorca maíz, escorias, ceniza de bagazo de caña de azúcar, polvo de vidrio (GP, Glass Powder) y residuos cerámicos en polvo (CWP, Ceramic Waste Powder). Algunos otros que no son tan comunes pueden ser: residuos de arena de fundición de piezas de motores de automóviles, ceniza de pasto de elefante, lodo de granito, ladrillo de arcilla. A continuación, se muestran los diferentes componentes de algunas SMC comunes.

Tabla 6 Composiciones químicas de algunos SMC [14]

Componentes (%)	FA	GGBS	GP	CWP	G-POFA
CaO	6.75	35	10.45	1.70	5.80
SiO <sub>2</sub>	51.43	39	72.08	68.6	59.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.93	6	2.19	17.0	3.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.29	0.75	0.22	0.80	6.33
MgO	1.95	12	0.72	2.50	4.87
SO <sub>3</sub>	0.54	1.10	-	0.12	0.72
Na <sub>2</sub> O	0.54	-	13.71	-	0.18
K <sub>2</sub> O	0.77	0.40	0.16	-	8.25
TiO <sub>2</sub>	1.74	-	0.10	-	-

Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	-	0.01	-	-
MnO	0.02	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.08	-	-	-	-
NiO	0.01	-	-	-	-

En concreto, las cenizas volantes se obtienen de la combustión del carbón de plantas energéticas y suelen contener SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO y existen de varias clases. La clase F que tiene un porcentaje pequeño de calcio (inferior al 5% de CaO) y la clase C con un mayor porcentaje de calcio (superior al 15% de cal).

Incorporar FA modifica la composición final del cemento sumando tanto en resistencia como en durabilidad. Además, el material resultante posee menos porosidad que el CP (Cemento Portland) y es más resistente al deterioro prematuro, corrosión, al fuego y al ácido. Posee mayor resistencia a la compresión y a la tracción y mayor durabilidad que el CP. Tiene un costo menor que el cemento, por lo que, su uso abarata el coste de producción. Cuanto más pequeño sea el tamaño de sus partículas la resistencia a la compresión del cemento aumenta considerablemente.

Para estructuras que están expuestas a ataques fisico-químicos y ambientales se suele utilizar humo de sílice. Sus altas resistencias a compresión oscilan entre 55.15 – 137.89 MPa y son proporcionales a la relación de agua/cemento y a los porcentajes de humo de sílice.

Los SMC tienen una serie de costos asociados al transporte ya que, su obtención se encuentra en lugares específicos y puede encarecer su coste para el cliente final. Por lo que, las emisiones relacionadas con el transporte hacen que no sean 100% medioambientalmente neutras. Aunque la incorporación de un sustitutivo de este tipo puede reducir el costo del cemento. También hay que tener en cuenta la energía y las emisiones asociadas a la producción de las SMC porque, por ejemplo, las GGBS necesitan enfriarse con agua, secarse y posteriormente un proceso de molido. La fibra de palma y la cáscara de palmiste se queman para crear POFA (Palm Oil Fuel Ash, ceniza combustible de aceite de palma) y los residuos de cerámica y vidrio tienen que ser triturados hasta un polvo fino antes de que puedan ser utilizados como sustituto del cemento. El tiempo y la energía embebida juegan un papel importante para abaratar los costes.

El impacto ambiental que se produce en la fabricación con estos materiales suele estar asociado a procesos secundarios como molienda, tamizado o cribado (separación de componentes de diferente tamaño), lavado, secado y transporte. Además, hay que entender que algunas partículas que se quieren volver a utilizar pueden resultar tóxicas para la salud humana y conllevar al deterioro de los sistemas inmunológicos de las personas. Se han realizado ciertos estudios en los que se ha concluido que con un hormigón GGBS y un hormigón puro (sin SMC) existen variaciones en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Con un 30% y 70% de GGBS se emiten respectivamente el 70% y el 32% de las emisiones para producir cemento puro.

Reflexionando sobre este estudio y otros que se han realizado, se puede concluir que las emisiones de CO<sub>2</sub> pueden reducirse significativamente con el uso de SCM. Cuanto mayor porcentaje de SCM menores emisiones de dióxido de carbono. Por otro lado, cuanto mayor es el porcentaje de cenizas volantes también el impacto ambiental es más bajo.

*Tabla 7 Diferentes porcentajes de cenizas volantes y sus repercusiones tóxicas [14]*

	25% cenizas volantes	35% cenizas volantes	50% cenizas volantes
Ecotoxicidad (Km)	1006	833	1394
Toxicidad humana (Km)	1680	1406	2308
Recursos y fósiles (Km)	5780	4654	7500

Para ver los rasgos generales de una mejor forma se procede a insertar una matriz de decisión y poder tener una visión más general de los diferentes tipos de SMC existentes:

↑: Aumentan

↓: Disminuyen

*Tabla 8 Características con diferentes SMC [15]*

Criterio general	Criterio particular	FA	GGBS	SF	Metacaolín
	Sustitución parcial del cemento (%)	30-35%	5-60%	5-15%	10-20%
Factores principales	Cohesividad	↑	-	↑	↑
	Trabajabilidad	↑	↑	↓	↑
	Uso de energía	↓	↓	↓	↓
	Porosidad, permeabilidad	↓	↓	↓	↓
	Emisiones CO <sub>2</sub>	↓	↓	↓	↓
	Durabilidad	↑	↑	↑	↑

Resistencia a edades tempranas	↓	↓	-	↑
Resistencia a edades posteriores	↑	↑	↑	↑
Resistencia corrosión	↑	↑	↑	↑
Uso de agua	↓	↓	↓	↑

## 10.2.- Cemento de sulfoaluminatocálcico o cemento belítico (CSA)

La química del cemento se puede modificar a un sistema que no sea a base de cemento portland. Existen varias formas tales como escorias activadas con álcali, cenizas volantes, o arcillas calcinadas ( $LC^3$ ), escorias activadas al sulfato (cementos supersulfatados) o cementos puzolánicos. Pero una alternativa prometedora con bajas emisiones de dióxido de carbono en la producción del clinker es a base de sulfoaluminato de calcio (ye`elimita,  $C_4A_3S$ ). En el CP sus propiedades tienen que ver, principalmente con los hidratos de silicato de calcio. En esta nueva alternativa, son los hidratos de sulfato de aluminato de calcio los que generan grandes resistencias mecánicas.

A continuación, se mencionan las características más interesantes sobre este tipo de cementos en comparación con el CPO:

*Tabla 9 Comparación entre cemento portland ordinario y sulfoaluminato de calcio [16]*

	Cemento portland ordinario (CPO)	Cemento sulfoaluminato de calcio (CSA)
Fases principales	$C_3S$ , $C_2S$ , $C_3A$ , $C_4AF$	$C_4A_3S$ (ye`elimita)
Materias primas	Caliza y arcilla	Caliza, bauxita y anhidrita
Temperatura de cocción	1450°C	1250°C
Liberación de $CO_2$ de las materias primas	$C_3S$ : 1.80 g/ml	$C_4A_3S$ : 0.56 g/ml
Adición de yeso	4-8 % en peso	15-25 % en peso

Principales productos de hidratación	Fases de C-S-H, portlandita, etringita, fases de AFm.	Etringita, fases de AFm, Al(OH) <sub>3</sub> amorfo
Molienda dificultad	Media	Fácil

La ye'elimita es un mineral del grupo de los minerales sulfatos. Su nombre es gracias a la localización donde se encontró por primera vez que fue en Israel, en Har Ye'elim en 1983.

Se puede observar en la tabla 9 que la temperatura de combustión del CSA es menor que el CPO por lo que el proceso será más económico al utilizar menos cantidad de energía para tener que calentar el producto. Siendo el calor de formación de la ye'elimita de 800 KJ/Kg que es notablemente inferior al C<sub>3</sub>S del CPO con 1848 KJ/Kg. Se considera una alternativa prometedora por la baja emisión de CO<sub>2</sub>. En comparación, la alita emite 1.8 g de CO<sub>2</sub> por ml de la fase de cementación y ye'elimita libera sólo 0.56 g/mL. También resulta más sencilla su molturación. Los clínteres CSA debido a su enorme porosidad (en comparación con los CPO), conllevan a un menor consumo de electricidad en el proceso de molienda.

Los cementos CSA tienen un desarrollo muy rápido de resistencias mecánicas (incluso a bajas temperaturas), buena resistencia a las heladas durante la hidratación y en condiciones normales, buena resistencia a la degradación y durabilidad frente a aguas agresivas.

La importancia de este hallazgo radica en la repercusión de su resistencia mecánica. La combinación entre el sulfoaluminato de calcio y la belita (CSAB), resultado del C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S y del sulfato de calcio dihidratado (yeso) hace que el proceso de fraguado y endurecimiento sea más rápido que en el CPO. Con el hormigón CSA la resistencia es de 65-70 MPa en un día, lo que es el doble que la del hormigón ordinario.

Tabla 10 Tipos de cementos de sulfoaluminato (CSA) y sus componentes [17]

NOMBRE (ACRÓNIMO)	FASE PRINCIPAL	FASES SECUNDARIAS O MENORES
Cemento de sulfoaluminato de calcio (CSA)	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S, C <sub>4</sub> AF, Cs, C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>
Cemento sulfoaluminato-belita de calcio (CSAB)	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S, C <sub>4</sub> AF, Cs, C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>
Cemento de sulfoaluminato de calcio rico en belita (BCSA)	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S, C <sub>4</sub> AF
Cemento de belita-sulfoaluminoferrita (BCSAF)	α - C <sub>2</sub> S, C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S y C <sub>2</sub> A <sub>x</sub> F (1 - x)	C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>

Cemento de sulfoaluminato de calcio rico en alita (ACSA)	$C_4A_3S$	$C_3S, C_2S$
--	-----------	--------------

Los CSA han sido utilizados en China durante años en aplicaciones como puentes, tuberías, fugas, materiales de prevención de filtraciones y pozos de petróleo en alta mar. Por otro lado, el cemento CSA actúa mejor como matriz para el refuerzo de la fibra de vidrio. Al tener un bajo módulo de elasticidad disminuye la permeabilidad del hormigón, (concreto) fraguado, condiciones indispensables para la construcción de pozos. En cambio, CPO es más permeable y frágil.

La utilización de CSA es más respetuosa con el medio ambiente por su menor temperatura de cocción (menos de 1250°C para el proceso de clinkerización) y menor emisión de CO<sub>2</sub> que el CPO (más de 1450°C) [16], lo que se traduce en una reducción de consumo energético del 35%.

Comparando la huella de carbono del CSA frente al CPO se puede concluir que aportan 0.6 Kg de CO<sub>2</sub>/Kg de cemento y 0.9 Kg de CO<sub>2</sub>/kg respectivamente.

Resumiendo, con la utilización de CSA:

- Se reduce el CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera en un 35-50%.
- Se reduce la energía calorífica en un 35% porque se calcina a 1250°C que es menor que 1500°C (CPO).
- Endurecen muy rápido.
- Menor tiempo de curado
- Mayor durabilidad
- Menor calor de hidratación
- Baja permeabilidad
- Menor resistencia a la carbonatación que el CPO [18]

### 10.3.- Cemento supersulfatado (CSS)

Son cementos ecológicos compuestos de escoria granulada de alto horno (GGBS) molida (400-500 m<sup>2</sup>/kg, Blaine) con una fuente asulfatada, principalmente anhídrita o yeso. La caliza no participa en su desarrollo. El parámetro Blaine representa la finura del cemento en m<sup>2</sup> de superficie exterior de las partículas de cemento por cada kg de ese material, por lo que, en este caso, significa que la suma de las superficies de todas las partículas existentes en un kg, de esa muestra pueden cubrir un área de 400-500 m<sup>2</sup>. Cuanto mayor área específica el grano es más fino. No se precisa de ningún clínter en comparación con el cemento ordinario, lo cual, puede reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 90%, porcentaje más elevado que en el caso de los CSA. La resistencia es muy parecida que el hormigón ordinario. En ensayos convencionales se estima la resistencia a compresión alrededor de 32,5MPa a los 28 días.

La molienda hay que tenerla muy controlada porque cuanto más finas sean las partículas de cemento pueden presentar ciertas desventajas no deseadas como:

- Deterioro más rápido por la atmósfera
- Reacción más fuerte con los agregados alcalinos reactivos
- Creación de pasta con demasiada contracción que da lugar al agrietamiento
- Costos considerables [19]

Se agrupan dentro de la química sostenible porque tienen un porcentaje muy bajo de Ca (40%) y mayor cantidad de óxidos. Poseen un 35% de SiO<sub>2</sub>, un 14% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 6% de MgO frente al 21%, 8% y 2% respectivamente del CPO.

Características:

- Muy alta resistencia a los sulfatos
- Baja permeabilidad debido a su estructura compacta y densa
- Mayor resistencia a la carbonatación que el CPO
- Menor retracción de la matriz endurecida y menores tensiones térmicas producidas durante la hidratación por el bajo calor ocasionado indican una mayor resistencia a la micro fracturación.

Las aplicaciones pueden ser muy diversas: Hormigones en ambientes marinos, cimentaciones en ambientes agresivos, plantas de tratamientos de aguas residuales, revestimiento de túneles y presas [18].

#### **10.4.- Green cements**

Los cementos verdes son un tipo de producto ecológico que está empezando a tomar cada vez más fuerza en el campo de la construcción por su bajo impacto ambiental y minimizando las emisiones de gases invernadero, con la consiguiente minimización de la huella de carbono.

Existen varios tipos y se detallarán a continuación algunas propiedades, así como, lograr buscar algunas alternativas y tener más posibilidades para no utilizar en lo posible el cemento portland como material principal en la construcción de todo tipo de estructuras en la sociedad actual.

**10.4.1.- Cemento Ekkomaxx:** Tiene su origen en una empresa de Estados Unidos llamada Ceratech. A pesar de que la caliza no se utiliza como materia prima en este tipo de cemento, su principal compuesto son las cenizas volantes (95%), mezcladas con aditivos líquidos renovables (5%). Es importante mencionar que este tipo de cemento disminuye a la mitad la utilización de agua y el empleo de material virgen. Son ventajas que repercuten en la huella hídrica del planeta y la extracción de combustibles fósiles. Las distintas potencialidades del Ekkomaxx son la alta resistencia inicial que presenta junto con una gran resiliencia.

Con él se consiguen propiedades finales superiores a los productos fabricados con cementos del tipo I/II, III, IV.

También presenta una buena resistencia a agrietarse impidiendo que el producto final termine por fraccionarse. Un dato relevante es la alta resistencia a la corrosión que triplica en número al cemento convencional, así como, la durabilidad que ofrece.

**10.4.2.- Cemento de oxiclорuro de magnesio (MOC):** Este material está, compuesto principalmente, por polvo de óxido de magnesio (MgO) y una solución concentrada de dicloruro de magnesio (MgCl<sub>2</sub>). Una de las características de este producto ecológico es su rapidez en el período de fraguado, lo que permite, al MgO absorber el CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Hay que tener regulada la cantidad de agua que se añade porque se ve reflejado en su resistencia final, pero existen alternativas para volver a incrementar esa resistencia mediante la introducción de cenizas volantes (en torno a un 15% de la composición total) y otro 15% de humo de sílice. Estos dos últimos aditivos citados anteriormente rellenan esos huecos dentro de la estructura molecular del cemento consiguiendo evitar defectos internos como los poros más significativos y aportando una densidad mayor. Esta intervención implica una mayor durabilidad y resistencia a la compresión. Una desventaja remarcable de este tipo de material es la corrosión que proporciona a los aceros, por lo que, su utilización en el hormigón armado no es nada recomendable.

**10.4.3.- Ferrocemento:** La combinación de dos subproductos de desecho de la industria de vidrio y del acero conforman este material. En concreto el hierro y la sílice. Y se utilizan para construir depósitos de agua, barcos y algunas esculturas.

**10.4.4.- Cemento de carbón secuestrado:** Se produce a través de salmuera o agua del mar. El agua del mar hace de filtro para el dióxido de carbono y es el medio por el cual se extraen el magnesio y el calcio. Finalmente, este cemento es más fuerte que el cemento Portland.

**10.4.5.- Cemento Novacem:** Es una aleación entre MgO y SiO<sub>2</sub> y carbonatos magnésicos. Una gran alternativa dentro del elenco de los cementos verdes porque no involucra el contenido de caliza en su composición y porque se produce un proceso apresurado de carbonatación del silicato de magnesio que pasa a convertirse en carbonato magnésico (700°C - 800°C). Se consiguen hormigones con resistencias entre 50 MPa y 60 MPa a los 28 días de curado.

## 10.5.- LC<sup>3</sup>

En la búsqueda sobre nuevas maneras de incorporar diferentes porciones de materias primas, surge el LC<sup>3</sup> (en inglés: Limestone Calcined Clay Cement, piedra calcárea y arcillas calcinadas) es una mezcla a la que se añade una mayor cantidad de arcilla y reduce la cantidad de Clinker. Se podría reducir las emisiones de

entre 400 y 800 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales. El LC<sup>3</sup> se formula empleando yeso (5%), caolín calcinado (30%), piedra calcárea (15%), y clínker (50%).

En el siguiente diagrama de barras se pueden ver diferencias de las resistencias mecánicas a compresión según el período de 90 días.

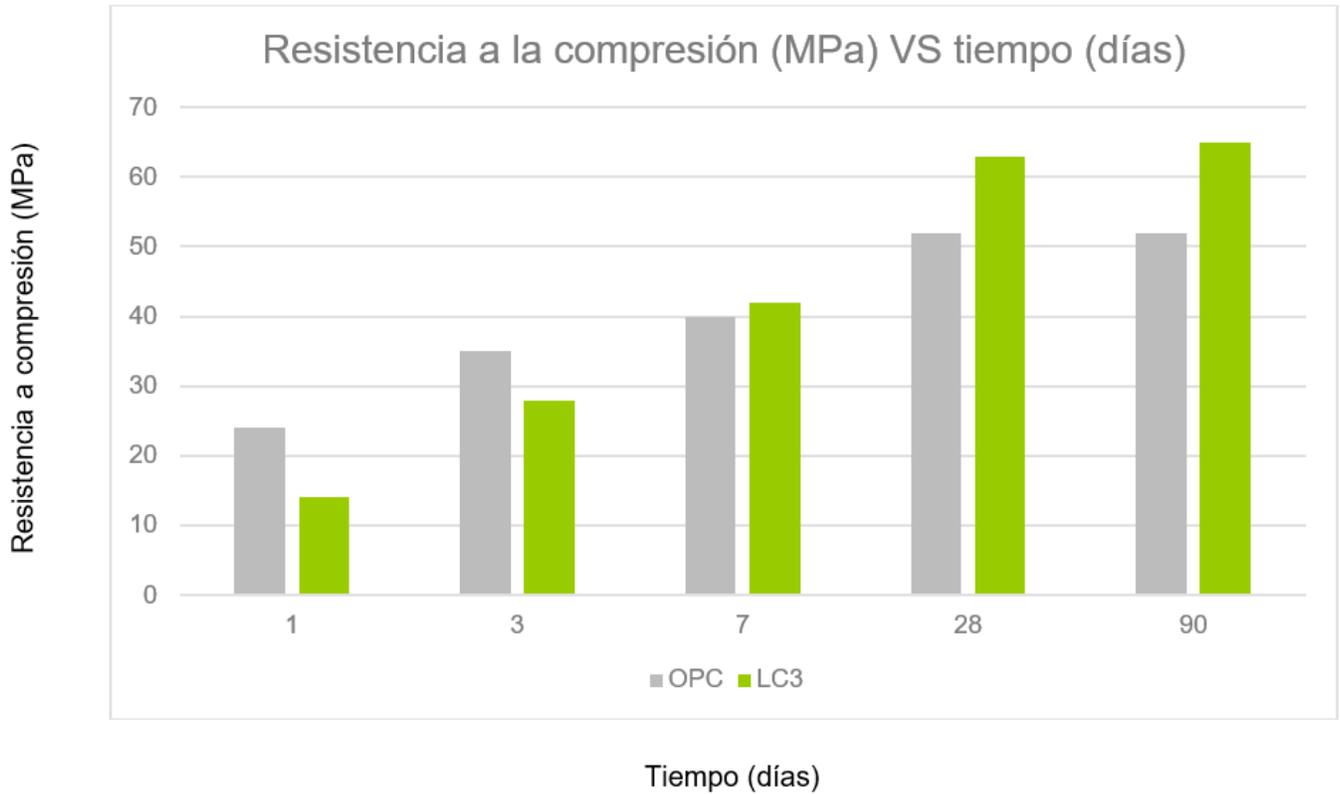


Ilustración 9 Diagrama de barras entre la resistencia a compresión y el tiempo a 90 días del CPO y el LC<sup>3</sup> [20]

A lo largo de las primeras 24 horas el LC<sup>3</sup> adopta resistencias próximas a 15 MPa y se encuentra por debajo del cemento portland ordinario (24 MPa). Con el paso del tiempo, en un plazo de 28 días el LC<sup>3</sup> alcanza 63 MPa y se pone por delante del CPO (52 MPa). Este acontecimiento tiene lugar por el contenido de alúmina que retrasa el proceso puzolánico.

A continuación, se incorpora la tabla 11 para observar claras diferencias entre diferentes parámetros del cemento portland y el LC<sup>3</sup>:

Tabla 11 Comparación entre LC<sup>3</sup> y cemento portland [21]

TIPO DE CEMENTO	TEMP. PROMEDIO DE FUSIÓN (°C)	RESISTENCIA MECÁNICA (28 días MPa)	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> (KG/T DE CEMENTO)	REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO <sub>2</sub> (%)
Portland (Tipo I)	1350-1450	52	745	0
LC <sup>3</sup> (30% arcilla calcinada)	600-800	63	450	40

### 10.6.- Ceniza de bagazo de caña de azúcar

La elaboración del azúcar produce una cantidad elevada de residuos. La ceniza de bagazo de caña (CBC) es un tipo de residuo generado en esta industria manufacturera y se ha investigado sobre él y sus posibles ventajas.

Aunque actualmente, se concluye que reduce el impacto ambiental pero no se aconseja su aplicación en el ámbito de la construcción por su escasa resistencia a la compresión. Muchos estudios respaldan la teoría de poder utilizarlo como sustituto parcial del agregado fino en el mortero. Se realizaron unos ensayos a compresión con un 20% y un 40% de CBC y se analizó durante un período de 28 días. En la siguiente gráfica se puede observar su escasa resistencia a compresión según se incrementa el porcentaje de ceniza. Se desaconseja utilizar estas cantidades de CBC, aunque si que puede tener un efecto beneficioso realizando estudios adicionales ya que su escasa energía de uso durante el procesamiento a 700°C y su reducción de la huella de carbono [22].

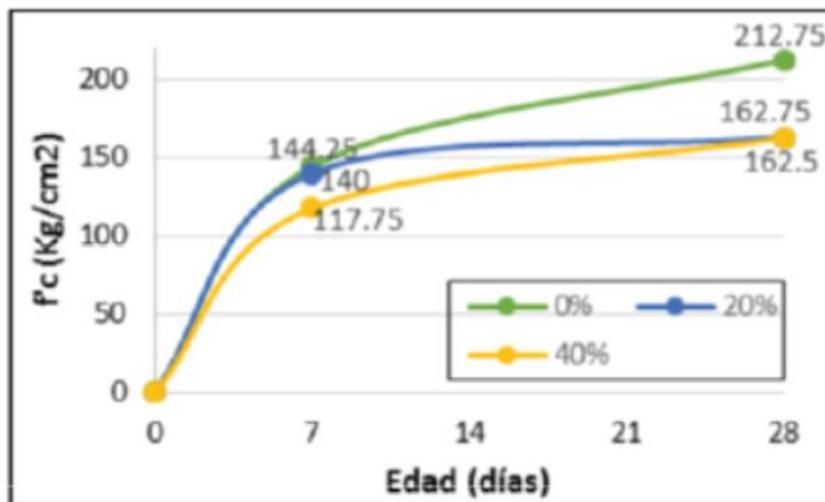


Ilustración 10 Resistencia a compresión de cemento con diferentes porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar en función del tiempo [22]

Para visualizar mejor un tipo de hormigón hecho por bagazo de caña de azúcar se inserta la ilustración 10 y poder ver las dimensiones de diferentes bloques de hormigón y su apariencia física.



*Ilustración 11 Hormigón con cenizas de bagazo de caña de azúcar*

Como se puede observar en la ilustración 11, este hormigón presenta una apariencia menos compacta y de color oscuro que el hormigón fabricado a base de cemento portland.

### **10.7.- Geopolímero**

También denominado cemento activado con álcali. No se obtiene a partir del óxido de calcio (cal), para evitar el impacto ambiental de la descarbonatación de la caliza, en cambio, se produce por medio de los aluminosilicatos. Puede contaminar menos y emitir un 95% menos de CO<sub>2</sub> que el cemento portland. Es una combinación de agua, arena fina y aligante geopolimérico. Hoy en día se ha utilizado para la construcción de edificios universitarios y aeropuertos [23].

Las últimas investigaciones resaltan la importancia de obtener morteros geopoliméricos para obtener un cemento con mejores prestaciones, creando así, un reemplazo del CPO. En un estudio reciente, se evalúan las propiedades mecánicas y la durabilidad de un mortero geopolimérico creado a partir de escoria granulada de altos hornos con ciertos activadores industriales.

Dentro de la búsqueda realizada en materiales opcionales al cemento portland se encuentran los que proceden de la activación alcalina de aluminosilicatos naturales (arcillas) y subproductos industriales como las cenizas volantes y las escorias de alto horno. Al fin y al cabo, un subproducto es un residuo producido de un determinado proceso al que se le suele ampliar su vida útil y que no acabe dañando el ecosistema en ciertos vertederos pudiendo reutilizarse. La escoria granulada de alto horno es un residuo que se genera en la producción de arrabio para la producción de aceros y las cenizas volantes son igualmente residuos,

pero provenientes de la combustión del carbón en plantas energéticas. La activación alcalina es un segundo componente adicional esencial en desarrollo de un cemento alcalino siendo estos activadores precipitados en una mezcla como una disolución o en forma sólida mezclado con cenizas o escoria.

Los cementos que se desarrollan con escorias activadas alcalinamente utilizan un 70% menos de combustibles fósiles y de energía eléctrica que los CPO por lo que suponen una fuente barata y útil de producir que todavía está siendo investigada. Tiene dos escenarios ventajosos en los cuales las canteras naturales dejan de destruirse y de contaminar y, por otro lado, se da una segunda vida útil al subproducto industrial derivado del arrabio que se almacenan de una forma desorganizada. Además, satisface las necesidades estructurales en durabilidad y resistencia mecánica.

Los geopolímeros son polímeros orgánicos que se sintetizan del petróleo y mediante un proceso de polimerización llamado policondensación se forman cadenas estables a temperaturas de 1250°C. La red tridimensional que forma un geopolímero es llamada red ialato y se muestra en la siguiente ilustración los átomos que se ven involucrados en su estructura:

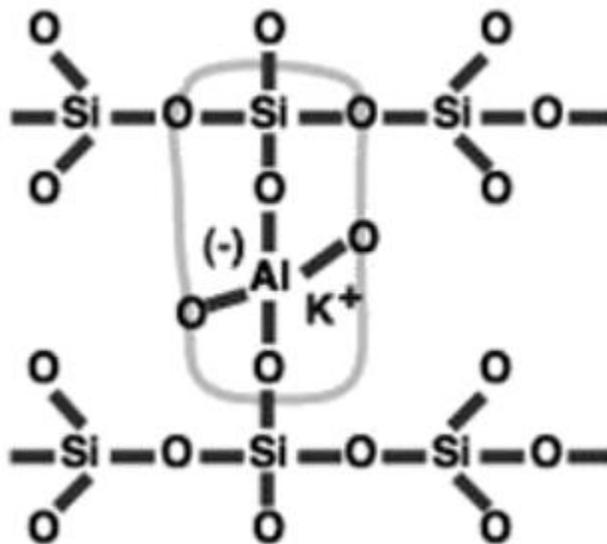
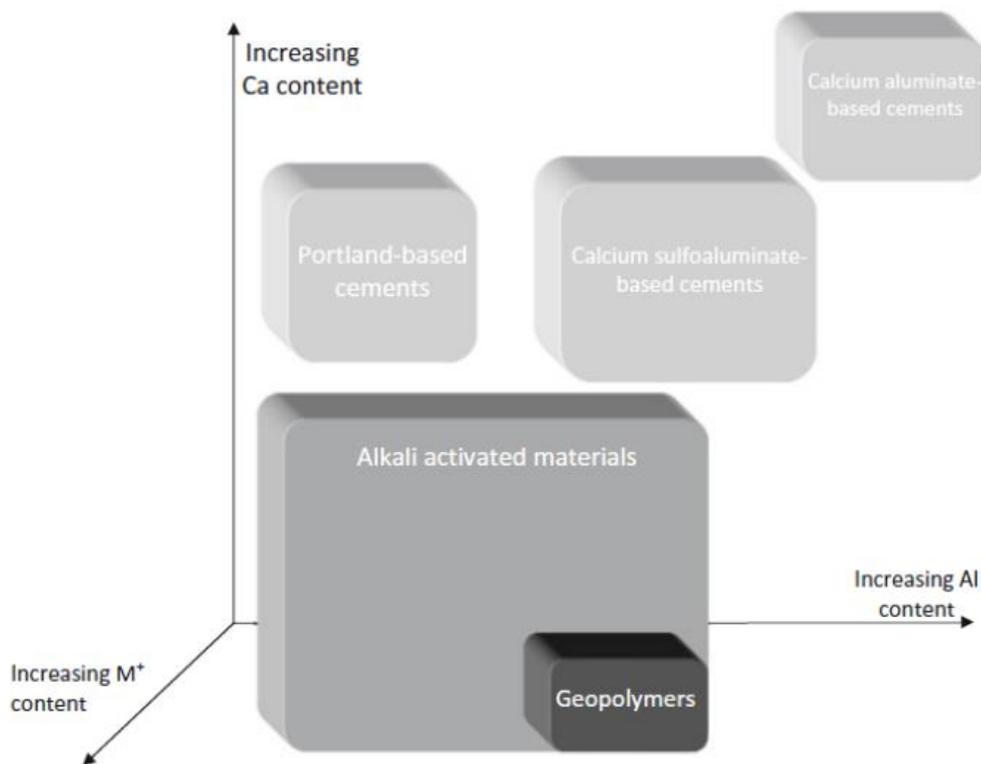


Ilustración 12 Red ialato del geopolímero [23]

Los materiales activados alcalinamente son composiciones químicas de carácter básico con un potencial de hidrógeno (ph) mayor que 7 compuesto principalmente por aluminosilicatos artificiales o naturales que abastecen de cationes de metales alcalinos que se muestran como aceleradores de las reacciones existentes durante el fraguado y aportan grandes propiedades adherentes. Estos activadores forman un gel C-A-S-H con fases secundarias tales como la calcita, hidrotalcita y fases de aluminato cálcico hidratado (Afm, monosulfoaluminato). Estos activadores pueden desglosarse en seis grupos distintos según sus composiciones químicas. Existen los hidróxidos alcalinos, sales de ácidos débiles, silicatos, aluminatos, aluminosilicatos y sales de ácidos fuertes.

Los álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) forman el gel que absorbe agua, se dilata y genera presiones internas que provocan la fisuración de cemento. Los problemas de expansión se pueden evitar utilizando menor contenido de álcalis:  $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O} < 0.6\%$ . La expansión del cemento ocurre cuando aumenta el volumen y termina por fraccionarse o desintegrarse.

Para entender mejor lo que son los geopolímeros se inserta esta ilustración 13 sobre la clasificación de materiales activados alcalinamente. Los geopolímeros se encuentran en aquella área de tono más oscuro debido a que requieren de concentraciones mayores de solución alcalina (potasio/calcio). Tienen alto contenido en aluminio y bajo en calcio como se puede observar a continuación.



*Ilustración 13 Clasificación de materiales alcalinos activados [23]*

Existen varias aplicaciones en las que se han utilizados cementos activados alcalinamente como terraplenes para ferrocarriles, edificios de 15 plantas y trincheras de ensilaje. Estas aplicaciones suelen ser más utilizadas en la zona oriental como puede ser la Unión Soviética, China y Australia. Hay que de resaltar que los hormigones que son fabricados con ceniza volante activada poseen mejores resistencias mecánicas que los CPO, pueden combinarse con refuerzos de acero y tienen gran estabilidad dimensional.

### **10.7.1.- Características de los hormigones de escorias activadas alcalinamente frente a los CPO**

- Resistencia bacteriológica
- Ahorros de energía y menores costes
- Fraguado más acelerado
- Mayores resistencia mecánicas
- Menor calor de hidratación: Menor energía de hidratación de los metales alcalinos [K:  $3.43 \times 10^8$  J/kg-ión, Na:  $4.14 \times 10^8$  J/kg-ión]. Esto permite la fabricación de grandes obras en masa.
- Mejor impermeabilidad. La permeabilidad se asocia directamente a la durabilidad del material porque examina la velocidad de acceso del agua que envuelve en ocasiones productos químicos agresivos pudiendo debilitar la microestructura del concreto.
- Resistencias a altas temperaturas
- Resistencia a ataques químicos

### **10.7.2.- Propiedades mecánicas**

Las resistencias que soportan estos tipos de concretos son de 60-150 MPa en edades tempranas de 3-7 días pudiendo incrementarse posteriormente. Aunque claramente estos valores se ven afectados por el método de activación y su dosificación, relaciones agua-cemento, temperaturas de curado y el tamaño de los finos.

Los geopolímeros se pueden ver utilizados en las siguientes aplicaciones:

- Paneles de madera resistentes al fuego
- Fusibles eléctricos
- Ladrillos
- Ingeniería aeroespacial con composite de geopolímero
- Material de reparación en pavimentos
- Carrocerías de automóviles de Fórmula 1 [24]

### **10.8.- Cemento con residuos cerámicos**

Existe otra materia prima alternativa para la fabricación del clínker del cemento portland. Hay ciertos crudos que presentan residuos cerámicos que provienen de baldosas con diferentes cocciones, tanto blanca como roja o una mezcla de las dos. Cabe destacar, que un factor relevante en este tipo de cementos es la granulometría de las partículas cerámicas. Cuando son menores de  $90 \mu\text{m}$ , la reactividad y aptitud a la cocción (relación con la velocidad de combinación de CaO) los posibilita para poder utilizarlos en nuevas tecnologías modernas. Considerando ciertas composiciones mineralógicas, hacen posible su integración como crudo de cemento [25].

La incorporación de desechos cerámicos, que han sido triturados previamente, en el concreto abre un campo de investigación lo suficientemente grande como para ser una vía de estudio a analizar en la fabricación de morteros.

Se comparan 5 muestras con 3%, 5%, 7%, 10% y 15% de cerámica molida en el cemento para analizar la resistencia a compresión establecidas con una relación agua/cemento de 0,6 para la mezcla del mortero.

Estas muestras han sido recogidas por cerámica sanitaria que es concretamente la que se utiliza en el diseño de equipos para las zonas de baño, tales como inodoros, lavabos y grifos.



*Ilustración 15 Piezas de cerámica*



*Ilustración 14 Polvo de cerámica*

En la ilustración 14 se observan ejemplos de piezas de cerámicas desechadas por rotura para ser molidas (ilustración 15) y que puedan ser objeto de estudio desde una perspectiva holística y generalizada para aportar datos reales sobre su intervención en la sociedad.

El polvo residual que se ve en la ilustración de la derecha ha sido pasado por un tamiz de número 200 (partículas de 0,074mm) que serán combinadas con cemento convencional y poder ver las diferencias cuando se dosifica el cemento con cerámicas para ver el punto óptimo de composición.

Consecuentemente, en el diagrama de barras de la ilustración 16, se aprecian diferentes resistencias a compresión en circunstancias prematuras y hasta un plazo de 28 días para ver su repercusión.



Ilustración 16 Resistencias a compresión a 1, 3, 7, 28 días de fraguado con 0%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15% de residuos cerámicos [25]

El reemplazo óptimo de residuo de cerámica fue con un 10% en la sustitución parcial del concreto. Además, se puede observar que a edades tempranas aumenta la resistencia en el ensayo a compresión y posteriormente los valores se ven incrementados levemente.

Con estos datos obtenidos se afirma que es un material aceptable para la elaboración de morteros, exceptuando el ensayo a compresión con un reemplazo del 15% porque a los 28 días de fraguado disminuye su resistencia a compresión exactamente a 31,014 MPa.

El reutilizamiento de cerámicas que han sido obtenidas de forma que iban a ser desechadas en la sociedad, puede garantizar una reducción de costos versátiles, reducción de la utilización de material cementante y una resistencia válida para poder ser utilizado [26]. De momento, los ensayos realizados en la actualidad han sido a nivel de laboratorio, pero puede que tengan en un futuro validez estructural en una versión mejorada de si misma.

## 11.- COMPARACIÓN ENTRE CPO Y CSA

A continuación, se realiza una comparación entre diferentes materiales para comprender la cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> que intervienen en los procesos de producción de ambos cementos y poder cuantificar su repercusión medio ambiental:

### 11.1.- Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> cuantificadas entre CPO y CSA

Para la producción de 1 t de Clinker de cemento se requieren 1,6 t de materias primas y 0,15 t de combustible (carbón). Por cada tonelada de CPO producido se emiten a la atmósfera 0,54 t de CO<sub>2</sub>, que proviene sólo de la descarbonatación de la caliza en los hornos de clinkerización. Además, hay que

contabilizar el consumo energético que supone la oxidación del combustible, en la cual se liberan 0,35 t de CO<sub>2</sub> y los procesos de molienda, en los que se consumen de media 110 KWh de electricidad (también por tonelada de CPO), lo que supone 0,09 t de CO<sub>2</sub> indirectamente. En total, la producción de 1 tonelada de cemento portland libera 0,97 t de CO<sub>2</sub>, lo que supone ese 6%, citado anteriormente, de las emisiones del gas invernadero imputables a esta industria.

### **11.2.- Comparación de las composiciones entre clinker de CPO y CSA**

Los principales componentes de los clinker de CPO son: alita (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, 65% aprox.), belita (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, 15% aprox.), ferrita (Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>, 10% aprox.) y aluminato (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, 10% aprox) (% en peso). El inconveniente de los BSA es la lenta cinética de hidratación lo que provoca bajas resistencias a edades tempranas (en comparación con los CPO).

Las fases principales de los clinker de CSA son belita y sulfoaluminato de calcio (sal de Klein, Ca<sub>4</sub>Al<sub>6</sub>O<sub>12</sub>SO<sub>4</sub>). Esta fase reacciona rápidamente con agua para dar etringita (AFt o Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub>·26H<sub>2</sub>O), fases que mejoran las resistencias iniciales.

Así, como los cementos CSA son ricos en belita (50% en peso de C<sub>2</sub>S) y los CPO son cementos alíticos (ricos en C<sub>3</sub>S, 60% de esta fase, para la producción de cementos CSA se utiliza una menor cantidad de calcita, ya que la belita demanda menos calcio y porque parte del carbonato de calcio se reemplaza por sulfato de calcio para obtener la Sal de Klein (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S, ye´elimita) [27].

## **12.- SOLUCIONES**

### **Opciones para respetar el medio ambiente en la producción del cemento:**

- 1.- Replantar los espacios donde se ha extraído la caliza principalmente.
- 2.- Adaptar los procesos de fabricación del cemento mediante procesos mecanizados a las condiciones del terreno sin tener que dañar el medio ambiente. Por ejemplo, la cinta transportadora de caliza desde la cantera hasta la fábrica que pueda pasar por encima de carreteras, montañas o hábitats con diversa flora y fauna sin tener que talar árboles, impidiendo así la deforestación y la migración de animales.
- 3.- Los residuos agrícolas podrían sustituir al cemento. Los residuos de la producción de alimentos agrícolas como la piel de yuca que no puede ser digerida por los animales y termina por contaminar el medio ambiente. Los restos de la yuca se convierten en un líquido que puede añadirse a la mezcla y reduce la cantidad de agua necesaria. Cuanta menos agua, menos cantidad de cemento para tener unas mismas propiedades mecánicas en cuanto a la resistencia última de compresión en un ensayo dinámico.

4.- Se podría utilizar, además de la yuca, el cacahuate, la cáscara de arroz, la caña de azúcar, se podría utilizar el producto que sea abundante y característico en ese país. Se puede sustituir también por cenizas de plantas de desecho.

5.- A parte, la cuestión de las medidas gubernamentales, tendrían que centrarse en la sostenibilidad y no sólo en la rentabilidad. Por ejemplo, promoviendo los productos premezclados. La gente podría reducir la cantidad de cemento que utiliza comprándolo ya premezclado con agua y arena. Esto último si los gobiernos lo incentivarán. Adquiriendo dicho producto premezclado reduce la cantidad de dióxido de carbono en torno a un 17%. El problema es que es más barato usar exceso de cemento que utilizar el producto premezclado. Estas alternativas requieren inversión e investigación, así como, educación y formación para todas las partes implicadas. Por lo tanto, se necesita educación y divulgación para la gente comprometida en este desarrollo sostenible.

## 13.- CONCLUSIONES

- El incremento de SCM en el cemento puro afecta a la resistencia a compresión, pero puede solucionarse mediante medios mecánicos moliendo los materiales a tamaños nano y micro. También puede mejorar incorporando activadores químicos.
- El aumento de SCM mejora enormemente la durabilidad del hormigón porque la microestructura se vuelve más densa, lo que produce una mejor resistencia del hormigón a la corrosión y a productos químicos.
- Mayores dosis de SCM en el hormigón produce menos niveles de emisión de CO<sub>2</sub>.
- Las diferentes SMC mencionadas anteriormente pueden sustituir parcialmente al CP y contribuir con el medio ambiente.
- Se desaconseja la sustitución parcial de ceniza de bagazo de caña de azúcar debido a su escasa resistencia a compresión con un valor de 162.5 kg/cm<sup>2</sup> (15,93 MPa) y tras 28 días de fraguado con el 20% y el 40% en composición de este material.
- El cemento manufacturado a base de geopolímero emplea el 70% menos de energía eléctrica y combustibles fósiles que los CPO. Y se pueden utilizar en varias aplicaciones relevantes como material de reparación en pavimentos e ingeniería aeroespacial con composite de geopolímero.
- La reutilización del 10% de residuo cerámico es admisible para la fabricación de morteros y el aumento del 15% comienza a reducir su resistencia a compresión.
- El CSA es una buena opción y puede tener aplicación en la construcción con resistencias a compresión que oscilan entre 50 MPa y 60 MPa, pero tiene una temperatura elevada de cocción de 1250°C en comparación con el LC<sup>3</sup> (600°C - 800°C).
- En definitiva, todas las alternativas mencionadas en el proyecto consiguen disminuir la huella de carbono y, por tanto, son grandes alternativas medidas desde el punto de vista medioambiental. Por otro lado, las propiedades mecánicas tales como la resistencia a compresión de los SAC, LC<sup>3</sup> y las activadas alcalinamente son muy parecidas a las del cemento portland convencional pasados 28 días.
- En conclusión, hay que realizar un balance sobre el impacto medioambiental que conlleva la producción de las alternativas propuestas en el transcurso de este trabajo y las propiedades mecánicas que poseen estos materiales. Según este balance el LC<sup>3</sup> con 30% de arcilla calcinada mejora la resistencia a compresión a los 28 días con un valor de 63 MPa y su período de producción reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en torno al 40% en comparación con el CPO, lo que le atribuye mejores prestaciones de cara a utilizarlo en construcción y pudiendo competir con el CPO.

## 14.- PRÓXIMOS TRABAJOS FUTUROS

- Realizar estudios respaldados con ensayos científicos de las alternativas propuestas a lo largo del proyecto para poder cuantificar las proporciones de materias primas y poder aportar información cuantitativa (resistencia última, tiempos de fraguado, densidad, expansión...) y cualitativa.
- Se recomienda realizar investigaciones acerca del cemento adicionado con ceniza de bagazo de caña de azúcar ya que, si se consiguiese aumentar la durabilidad y las propiedades mecánicas, en concreto, la resistencia a compresión sería un material excelente debido al efecto ambiental positivo que genera al estar reutilizando un residuo industrial y reincorporarlo en su ciclo de vida útil.
- Estudiar más a fondo los cementos incorporados con materiales activados alcalinamente porque abren una nueva oportunidad en la construcción. Poder llevar a la práctica ensayos y observar su durabilidad, deterioro, ventajas y tendencias en cuanto a las propiedades mecánicas.

## 15.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional, con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana*, Alejandro Ramón Martínez, Universidad Politécnica de Valencia, 2014.
- [2] *De la historia del cemento*, E. Vidaud, 2013
- [3] *Cemento y sus aplicaciones*, Cementos Pacasmay S.A.A., Dra. Ing. Rosaura Vásquez A., 2017
- [4] *Fórmulas de Bogue, facultad de ingeniería civil, "Universidad nacional San Luis Gonzaga de Ica"*, Tampe Díaz Marquinho Adilson Santos, 2013
- [5] *Materiales de construcción, ciencia y tecnología de los materiales. Ligantes: Cementos. Índice bloque 3.3* Universidad de Coruña, 2015
- [6] *Reducción de las emisiones CO2 en la producción del cemento empleando piedra calcárea y arcillas calcinadas*, Universidad Politécnica de Cataluña, Carlos Martín Echeverría Santos, 2022
- [7] *Fabricación de cemento (proceso de descarbonatación), Ficha técnica, Sistema Español de inventario de emisiones*, 2017
- [8] *Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*, Ana León-Vélez y Vanessa Guillén-Mena, 2020
- [9] *Elaboración de cemento vía seca y húmeda*, Mary Aranda, 2015
- [10] *The global Cement Report, International Cemento Review, Banco Mundial y FMI*
- [11] *Informe de inventario nacional gases efecto invernadero, comunicación a la comisión europea en cumplimiento del reglamento (UE), 2022*
- [12] *Fabricación de cemento (proceso de descarbonatación), Sistema Español de inventario de emisiones, Metodología de estimación de emisiones, Anexo III, 2017*
- [13] *Análisis de ciclo de vida en bloques de hormigón: comparación del impacto producido entre bloques tradicionales y con subproductos*, Maggi Madrid, Yokasta García Frómeta, Jesús Cuadrad, Jesús María Blanco, 2022
- [14] *High volumen Portland cement replacement: A review*, Chinyere O. Nwankwo, Gideon, O. Bamigboye, Lyinoluwa E.E. Davies, Temitope A. Michaels, 2020
- [15] *Materiales cementantes suplementarios*, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Fernando Cruz, David Martinez y Aubert Enamorado, 2019

- [16] *Calcium sulfoaluminate cement: an example of a low CO<sub>2</sub>- Alternative to Portland cement*, Frank Winnefeld, Switzerland, 2010
- [17] *Sulfoaluminate cement-based concrete*, Kedsarin Pimrasksa and Chindaprasirt, Chiang Mai University, 2018
- [18] *Cementos alternativos: al cemento portland: química verde*, Laureano Cornejo Álvarez, 2017
- [19] *Determinación de la finura del cemento portland usando el aparato de permeabilidad al aire de blaine*, Neville A.M., 2015
- [20] *Green Cement: Definition, types, advantages and applications*, The construction encyclopedia, 2020
- [21] *Reducción de las emisiones CO<sub>2</sub> en la producción del cemento empleando piedra calcárea y arcillas calcinadas (LC<sup>3</sup>=Limestones Calcined Clay Cement)*, Universidad Politécnica de Cataluña, Carlos Martín Echevarria Santos, 2022
- [22] *Análisis comparativo de resultados en el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como material sustituyente del cemento portland en el concreto*, CJ Peñaranda, MD Semprun, G Fuentes, AF Ruiz, 2020
- [23] *Evaluación de nuevos materiales aligantes alternativos al cemento portland tradicional para su potencial aplicación en la construcción de viviendas*, Universidad Católica de Santa María, Mayta Ponce y Denis Leonardo, Perú, 2019
- [24] *Obtención y caracterización de geoplímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento portland*, Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres, Universidad nacional de Colombia, 2017
- [25] *Empleo de residuos cerámicos como materia prima alternativa para la fabricación de clínker de cemento portland*, F. Puertas, I. García-Díaz, M. Palacios y S. Martínez-Ramírez, 2007
- [26] *Use of ceramic waste as a cement substitute in the mortar manufacture*, Paulina Viera y Carla Chicaiza, Universidad Central de Ecuador, 2018
- [27] *Hidratación de cementos de sulfoaluminato de calcio*, Ángeles G. De la Torre, M. Carmen Martín-Sedeño, Laura León-Reina, Antonio J.M. Cuberos, Gema Álvarez-Pnazo, Miguel A.G..Aranda, 2011