

# CEMENTANTES ALTERNATIVOS AL CEMENTO PORTLAND, LA INSOSTENIBILIDAD DEL MATERIAL PERFECTO

Martín Lara Carral<sup>1</sup>

## Resumen

La sostenibilidad de los materiales constituye uno de los temas fundamentales de investigación en el ámbito de la ciencia de la construcción. El Cemento Portland se erige como eje central de dicho sector, dado que su amplio espectro funcional y sus buenas propiedades mecánicas hacen de él un material casi perfecto. Sin embargo, el impacto negativo asociado a su ciclo de vida, en especial su ciclo de producción, es radicalmente elevado. Por ello, se exponen las alternativas actuales que ofrece el mercado y también aquellas que representan una opción factible y funcional en un futuro próximo. Conjugando una comparativa permanente entre las ventajas físico-mecánicas del Cemento Portland y los avances en la apuesta por el desarrollo de nuevos materiales de alto desempeño, competitivos, basados en materia prima local, de carácter sostenible y de bajo impacto, que cumplan con la normativa vigente.

**Palabras clave:** *sostenibilidad, residuos, Cemento Portland, Concreto Verde, propiedades mecánicas.*

## Abstract

Materials sustainability constitutes on the fundamental investigation themes in the field of construction. Portland cement stands as the central axis of the sector due to a broad functional spectrum and its good mechanical properties that has made it an almost perfect material. All the

---

1 Universidad Autónoma de Aguascalientes. Correo electrónico: elsi46@live.com

same the negative impact of its Life Cycle is extremely high, especially in its manufacturing cycle. Thus, actual alternatives offered by the market are outlined and also those that represents a feasible and functional alternative in the near future. Bringing a continuous comparison between Portland physicochemical advantages and the breakthroughs together, in favour of the development of high performing, competitive, local raw material based, sustainable and low impact materials in compliance with the currently regulations.

**Keywords:** *sustainability, residue, Portland cement, Green Concrete, mechanical properties.*

## Introducción

El cemento es producido por casi todos los países. El consumo de cemento se relaciona íntimamente con la actividad del sector construcción y, en general, con la actividad de cualquier sector económico. La producción global de cemento creció de 594 MT en el año 1970 a 2310 MT en 2016,<sup>2</sup> observándose el mayor incremento de producción en aquellos países que se encuentran en vías de desarrollo. En una tónica similar, se estima el crecimiento del consumo global de cemento en un 2.5% anual. La sociedad espera que el cemento haga del hormigón un material superior, resistente, duradero, versátil y económicamente rentable en todas las formas de construcción, desde casa hasta infraestructura. No obstante, su uso acarrea grandes costos medioambientales, destacando, particularmente, la enorme cantidad de energía consumida y CO<sub>2</sub> liberado durante su fabricación. Además, la obtención de áridos (cada tonelada de cemento requiere 1.5 toneladas de roca caliza) y materias primas necesarias para la generación de cemento, puede implicar la destrucción de ciertos hábitats así como ser causa de problemas de contaminación en el aire y agua de la zona.

Hoy en día, se están tomando diferentes medidas para minimizar dichos impactos sobre el medio ambiente, entre las que se destaca la sustitución de fracciones de Clinker por otros materiales, tales como las cenizas volantes o escoria de alto horno y el empleo de materiales reciclados. Sin embargo, con un enfoque global en la eficiencia de aplicación de todas las alternativas con las que se trabaja actualmente, se ha logrado una reducción de tan sólo el 16% en la Huella de Carbono del cemento. ¿Marca esta disminución un punto y aparte en el impacto ambiental y social de la producción de este material? ¿Se puede considerar siquiera el denominar ecológicos o sostenibles a estos productos? ¿Qué otras alternativas se están estudiando de forma paralela?

---

2 Mineral Resources Program (USA), <https://minerals.usgs.gov/>

## Impacto Ambiental del Cemento Portland Ordinario

El cemento Portland es un material esencial dentro del sector de la construcción ya que es el principal componente del hormigón y el encargado de agregar todos los demás componentes en una masa resistente y duradera. El Cemento Portland Ordinario (CPO) contiene alrededor de un 95% de clinker, cuya producción es responsable de un severamente impactante proceso de emisiones de gases de efecto invernadero y pérdidas de energía por fallos en la eficiencia de diseño del sistema productivo. La industria del cemento es, por tanto, responsable del 5-7% de la tasa de emisiones mundiales de gases de efecto invernadero causantes del cambio climático (Humphreys and Mahasenan 2002),<sup>3</sup> con una Huella de Carbono total de 1.003.555,2 TCO<sub>2</sub>/año.<sup>4</sup> El Clinker es el componente que mayor impacto ecológico produce sobre el medio ambiente. La industria del cemento soporta, de hecho, el mayor ratio de intensidad de energía por dólar de producto obtenido (U.S. EPA, 2007). La Figura 1 muestra el ciclo de producción de Clinker en relación a entradas de materias primas, salidas residuales, energía consumida y emisiones generadas.

En la fabricación del cemento Portland, puede ser empleado uno de los siguientes procesos: el proceso húmedo, el proceso de secado prolongado, el proceso seco con precalentado y el proceso seco con precalcificación. El proceso húmedo es el más antiguo y el que más cantidad de energía demanda, de modo que, progresivamente, las empresas se esfuerzan por adaptar sus instalaciones a alguno de los otros métodos. Además de la energía consumida y del CO<sub>2</sub> liberado, las actividades mineras necesarias para la obtención de la roca caliza pueden favorecer la destrucción de ciertos hábitats, así como la liberación de contaminación al aire y agua. Referente a este aspecto, se entiende que las canteras a cielo abierto provocan un impacto mucho mayor que las explotaciones mineras subterráneas, a pesar de que su coste es menor.

Como se ha mencionado, la fabricación del cemento requiere de una extraordinaria cantidad de energía. Las materias primas se “piroprocesan” en grandes hornos a temperaturas de unos 1.500 °C para obtener el Clinker. En 2016, el sector del cemento, consumió más de 500 trillones de BTus (British Thermal Unit) (Laboratorio de Ingeniería Sostenible, 2010)<sup>5</sup> de energía, casi el 2.4% del total de energía consumida por la industria americana (PCA 2006). La principal fuente de energía es el consumo de carbón, seguido del coque y de energía eléctrica comprada.

---

3 Humphreys, K. and M. Mahasenan (2002) “Climate Change” in Toward a Sustainable Cement Industry. Battelle – World Business Council for Sustainable Development.

4 Laboratorio de Ingeniería Sostenible (2010). Huella Ecológica del Cemento, pág 183.

5 Btu = 1.055,056 Julios = 252,164 Kilocalorías.

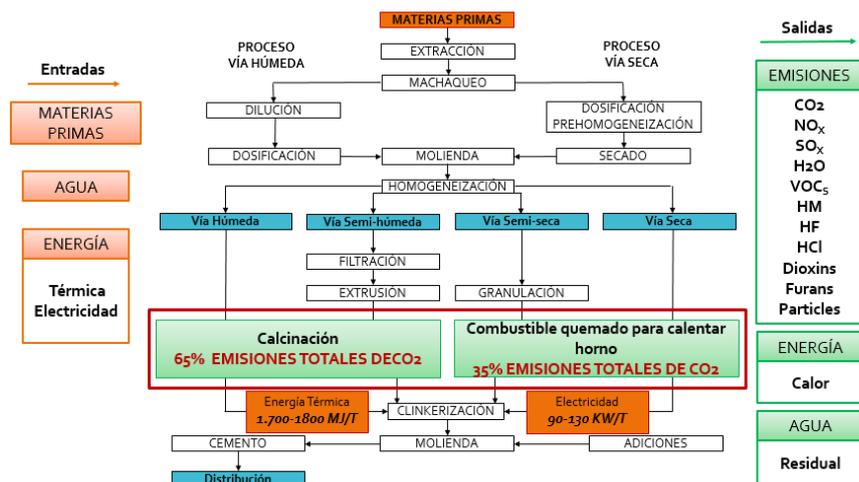


Figura 1. Gráfico de entrada y salida de materia y energía de Ciclo de producción de Clinker en Planta de Producción de CPO.

El requerimiento energético de una planta estándar de cemento se centra, por tanto, en el uso de combustibles fósiles, recurso no renovable que va acompañado de una tasa de emisiones de gases de efecto invernadero desmedida.

## Emisiones a la atmósfera

Las emisiones de gases de efecto invernadero generadas a lo largo del proceso productivo del cemento, provienen en un 80-90% del Clinkerizado, por descarbonatación de la materia prima (caliza) y uso de combustibles (carbón y energía eléctrica generada por quema de RNR). La Figura 2 muestra los ratios de generación de CO<sub>2</sub>-equivalentes, con base en el consumo de diferentes tipos de energía, para varios sectores industriales.

Dentro de la problemática de emisiones de gases de efecto invernadero, se debe prestar especial atención a los Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que se generan a través de la quema de combustibles fósiles a altas temperaturas. Los NO<sub>x</sub> son destructores agresivos de la Capa de Ozono y tienen relación directa con el proceso de Calentamiento Global. Es importante tener en cuenta también los SO<sub>x</sub> generados, producidos por los compuestos sulfurosos propios de las materias primas. Aunque es cierto que la naturaleza alcalina del Clinker propicia una tasa de reabsorción de entre un 70% y un 90%, la cuantía de gas liberado a la atmósfera es causa de

pérdida de calidad de aire, smog fotoquímico, lluvia ácida y problemas de salud para la población.

Asociados a una baja eficiencia de combustión, o una combustión incompleta, se produce la emisión de componentes químicos como los VOC<sub>s</sub> (Compuestos Orgánicos Volátiles) y el CO, nocivos para la salud pública, además de ciertos compuestos metálicos que son liberados a la atmósfera.

La emisión de partículas se producirá a lo largo de las operaciones de extracción de materiales en cantera y mina, así como en los procesos de calcinación, transporte, etc.; liberando partículas de diferente diámetro que causan severos problemas de salud y ambientales. Principalmente, aquellas menores de 2.5 micras (PM<sub>2,5</sub>), capaces de atravesar el tejido pulmonar y provocar serias enfermedades respiratorias.

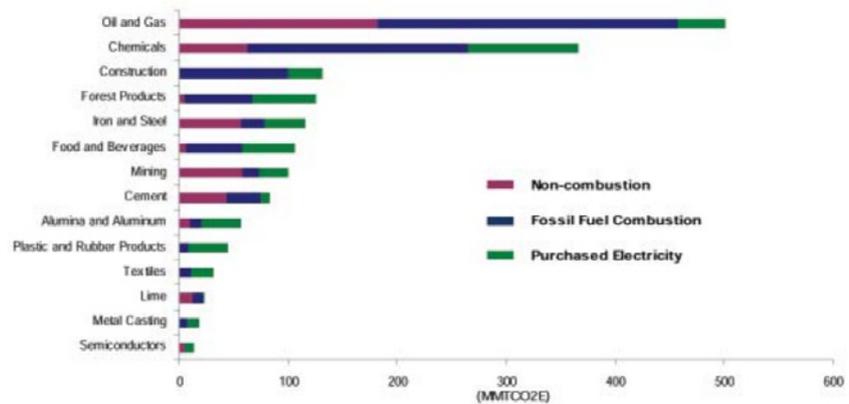


Figura 2. Emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con tecnologías de no combustión, combustión de combustibles fósiles y generación y consumo eléctrico de sectores industriales clave en MMTCO<sub>2</sub>E (millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>-equivalentes).<sup>6</sup>

### Alternativas comerciales

A raíz de los datos mostrados, se puede concluir que la manufactura tradicional de cemento es un proceso energéticamente intensivo (≈4,000 kJ/kg cemento, 25% de pérdidas) y medioambientalmente insostenible. Si bien es cierto que, desde la perspectiva global, existe una población mundial en crecimiento que precisa de infraestructura social y de vivienda, con una demanda de cemento en aumento, las restricciones ambientales son

6 Quantifying Greenhouse Gas Emissions from Key Industrial Sectors in the United States, U.S. EPA, May 2008, Chapter 1, page 7.

cada vez más estrictas (Davidovits, 1993)<sup>7</sup> y es necesario buscar opciones y esquemas alternativos de producción que minimicen el coste energético, ecológico y económico. Entre las medidas estudiadas en la actualidad destacan las siguientes:

- Vía seca, de mayor eficiencia productiva y energética (720- 800 the/t de clinker, frente a 1300-1500 the/t de clinker, Humphreys and Mahasenan 2002)
- Explotar opciones de combustibles alternativos, descartando aquellos de origen fósil, para desarrollar sistemas de consumo energético más eficientes.
- Desarrollo de cementos alcalinos (cementos mixtos) con partes porcentuales de materiales residuales que no requieren de procesamiento en clinker, como cenizas volantes (Fly Ash) o escorias de alto horno (Blast Furnace Slag). Dichos materiales forman parte del "Recognized Standard Wastes, RSW" y su uso, con base en su índice de calidad, se trata ya en numerosa normativa del ámbito de la construcción, aunque únicamente como aditivos para CPO.

Los materiales alternativos con propiedades cementantes, colaboran en la disminución de la generación de CO<sub>2</sub> en la producción de Clinker, fruto de la des-carbonatación del CaCO<sub>3</sub>, que representa alrededor del 80% de la materia prima (0.3Kg CO<sub>2</sub> /Kg cemento), y pueden ser clasificados teniendo en cuenta su composición química y los productos de hidratación formados como puzolánicos e hidráulicos; aunque la forma más sencilla de clasificación para estas adiciones minerales, quizás sea por la naturaleza de su origen como naturales (puzolana, arcilla y metacaolín) y subproductos (CV, escoria y humo de sílice). La Figura 3 representa los campos de composición química aproximada de los materiales alternativos o adiciones minerales, en un diagrama de composición SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

---

7 J. Davidovits, Emerging technologies symposium on cement and concretes in the global environment (Portland Cement Association, 1993)

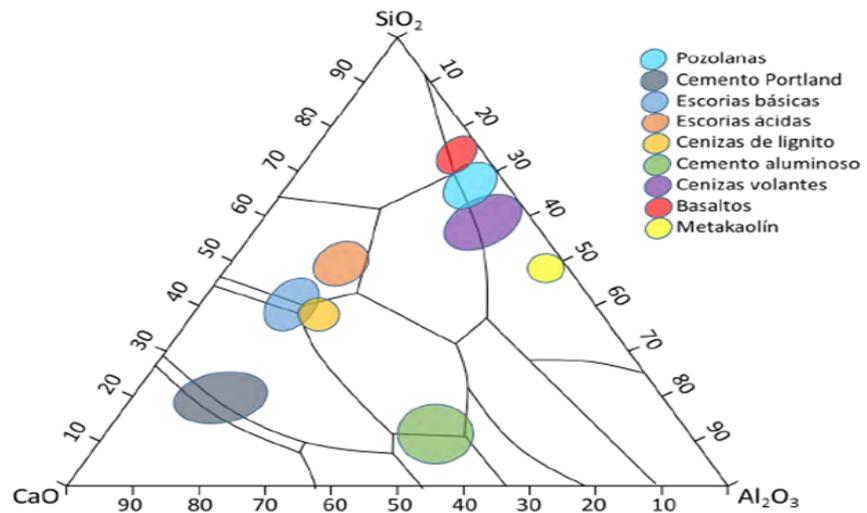
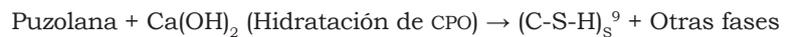


Figura 3. Composición química aproximada de los materiales que se emplean en construcción (Puertas 1993).<sup>8</sup>

Los materiales puzolánicos presentan una composición muy rica en  $\text{SiO}_2$  y Al (el conjunto sílice más alúmina varía a menudo entre el 70 y el 80 %). Como ejemplo, se puede citar la ceniza volcánica, el humo de sílice, la cascarilla de arroz, la ceniza volante y el kaolín. Son de carácter ácido, por lo tanto, presentan gran afinidad por compuestos de carácter básico. Están formados en su mayor parte por fase vítrea con una pequeña proporción de fase cristalina, lo que los hace muy reactivos. La Figura 4 muestra algunas de sus características. Las puzolanas por naturaleza poseen un valor cementante de poca o ninguna importancia, sin embargo, tras un proceso de molienda que las transforme en finos, y en presencia de humedad, reacciona ( $T^a$  ambiente) con el Hidróxido de Calcio producto de la hidratación del CPO, dando lugar a compuestos estables, poco solubles en agua, con un potencial cementante alto y que desarrollan resistencia por endurecimiento hidráulico.

La reacción de activación puzolánica es la siguiente:



La reacción genera cadenas de silicatos de calcio hidratados con alto valor cementante y elimina el hidróxido de calcio del cemento, que no

8 Puertas F (1993). Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. Mater Construcción; 43:37-48.

9 Silicatos de Ca hidratado de estequiometría no definida con alto valor cementante.

tiene de valor cementante, es fácilmente lixiviable y participa activamente en el ataque por sulfatos.

	Further processing	Characteristics	Sources
Silica fume ( Condensed/ Microsilica )	Material agglomeration for ease of operation	Spherical particles <1µm size High superficial area	Condensed vapours of the production of silicon carbide
Volcanic ash	Milling	Irregular particle shape Variable reactivity	Volcanic emissions
Rice husk ash	Calcination Generated heat used as fuel	Irregular morphology Very fine size High superficial area	Rice production
Geothermal silica	Washing	Irregular morphology Submicron-sized particles High superficial area	Geothermal vapour lines fouling (Electricity generation)
Kaolin	Thermal treatment up to 800 °C	Fine particle size High superficial area	Mineral
Fly ash		Varying size spherical particles similar or lesser than Portland particle size	Combustion of coal in power generation

Figura 4. Características generales de los materiales puzolánicos. Elaboración propia.

El término materiales hidráulicos hace referencia, por lo general, a escoria granulada de alto horno (Blast Furnace Slag), que interacciona con los productos de hidratación del cemento de manera diferente a las puzolanas, ya que las escorias cuentan con un alto índice de Ca en su composición química. La escoria posee una estructura matricial amorfa, con alta energía interna, lo que la hace termodinámicamente inestable y altamente reactiva.<sup>10</sup> El esquema básico de la reacción consiste en un ataque (activación alcalina) de los iones hidróxido a la estructura vítrea para disolverla y combinarla con el  $\text{Ca(OH)}_2$ , generado en la hidratación del CPO, produciéndose la precipitación de productos cementantes de tipo C-S-H.

La Figura 5 muestra los materiales de reemplazo con los que se están produciendo cementos compuestos comerciales. En cada caso se han obtenido mejoras importantes en sus propiedades mecánicas y durabilidad, alcanzando niveles de resistencia mecánica, para las mezclas de CPO y sílice condensada o escoria, de 120 MPa.<sup>11</sup>

Al respecto de los materiales hidráulicos, se están estudiando otras fuentes de suministro de residuos como las acerías o los procesos industriales de producción de P, Cu, Zn y Pb.<sup>12, 13</sup>

10 J.I. Escalante *et al.* (2001), *Cement and Concrete Res.*

11 Shi C, Krivenko P V, Roy DM (2006). Alkali-Activated Cements and Concretes. doi:10.4324/9780203390672.

12 Arnold (1997). C.D. Lawrence, en *Leas's chemistry of cement and concrete.*

13 M. Tufekci *et al.* (1997). *Cement and Concrete Res.* 27, 1713.

La tasa de sustitución de minerales puzolánicos, establecida por la industria cementera, es de hasta un 30%. En el caso de las escorias esta tasa varía entre un 10% y un 90% (en casos muy específicos), pero ambos productos tienen potencial para ser utilizados como componente único de una nueva generación de cementantes sin CPO. La Figura 6 presenta algunos de los cementos generados por activación química de residuos unidos a CPO y una valoración de resultados.

<p style="text-align: center;">PORTLAND CEMENT-BASED MODIFIED</p>	Basic binder	Replacement material	Mechanical strength
	Portland Cement	Fly ash	o
		Volcanic ash	o
		Blast furnace slag (BFS)	o
		Condensed silica	ooo
		Kaolin	o
		Geothermal silica	oo

Figura 5. Materiales para producción de cementos compuestos comerciales y grado de resistencia mecánica. Elaboración propia.

La activación alcalina de residuos y su combinación con CPO conlleva numerosas ventajas que se traducen en mejoras estructurales del cemento común (menor permeabilidad, resistencia a ataques químicos) y la inmovilización de desechos peligrosos en matrices de CPO. Otras ventajas son la durabilidad añadida frente a ataques químicos agresivos (agua de mar, HCl, sulfatos) que propicia su uso en medios extremos; como construcciones en la costa o plantas nucleares, el ahorro de energía gracias al sustitutivo que no necesita de clinkerizado y el factor de reducción de masa residual depositada en relleno sanitario.

Basic binder	Features	Observations
Alkali activated BFS	Excellent mechanical properties. 0% Portland cement.	Possible scope for incorporating further debris. 40% of costs saving.
Alkali activated fly ash	Acceptable mechanical properties. 0% Portland cement.	
Phosphor and copper production slag	Good mechanical properties. 0% Portland cement.	
Calcium sulfoaluminates	Developing. Outstanding features.	Lower degree of energy demand
Over-sulphurous cements	5% of cement 80-85% of Portland cement 10-15% of slag Plaster	Can not stand at high temperature curing processes

Figura 6. Cementos compuestos con residuos activados alcalinamente. Elaboración propia.

La opinión general desde el sector industrial es que, en comparación con estas ventajas, las desventajas tienen poco peso. No obstante, si el objetivo de este desarrollo tecnológico es reducir el impacto ambiental del cemento, estos logros no cuentan con demasiado valor. Finalmente, la necesidad de buscar opciones y esquemas alternativos de producción que minimicen el coste energético, ecológico y económico no se cumple con los cementantes compuestos y la razón es sencilla: no se ha eliminado el punto más perjudicial y de mayor impacto del proceso, la producción de Clinker. La Figura 7 muestra una comparativa de las emisiones de un CPO y las emisiones de un cemento compuesto.

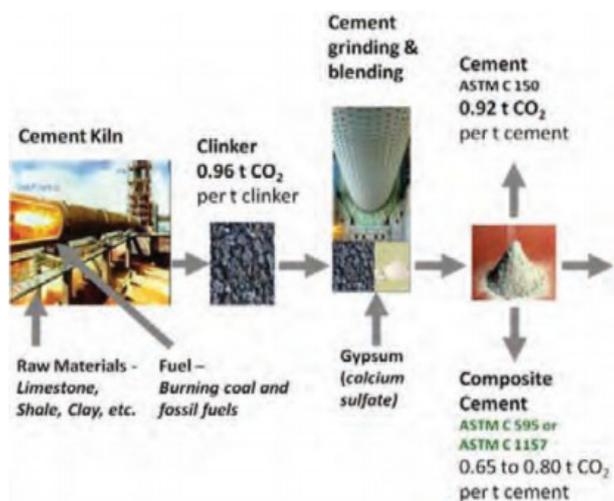


Figura 7. Emisiones totales del proceso productivo de una tonelada de CPO y una tonelada de Cemento compuesto<sup>14</sup>

### Alternativas en vías de desarrollo

Las opciones menos conocidas en el ámbito de desarrollo de nuevos cementantes son las pastas 100% residuales activadas alcalinamente. (La Figura 8 muestra un esquema de esta clasificación).



Figura 8. Tipos de activación alcalina con base en la materia prima utilizada, su composición química y el tipo de gel resultante. Elaboración propia.

Considerados los verdaderos “Cementos Verdes”, se basan en la activación alcalina eficiente de tres tipos de materiales:

*a. Escorias de Alto Horno, con un alto porcentaje de CaO en su composición química*

Estos materiales representan la activación alcalina original, desarrollada por Glukhovsky en la década de los 50 y 60. Se trata del mismo sistema de activación por medio de un álcali, pero a temperaturas de 60 a 85°C, lo que supone un ahorro energético considerable e implica una emisión de gases de efecto invernadero mínima.

*b. Cenizas Volantes, Caolín y Metacaolín (Geopolímeros) con una estructura de aluminosilicatos*

Los geopolímeros, concepto acuñado por Davidovits en 1980, son polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos, de estructura amorfa y tridimensional, que proceden de una reacción química llamada geopolimerización. Forman unidades tetraédricas, mediante uniones aleatorias de

átomos de Si y Al, y cationes alcalinos hidratados como  $K^+$  o  $Na^+$ , localizados en los espacios intersticiales.<sup>15</sup>

La producción de geopolímeros llega a generar alrededor de un 80% menos de  $CO_2$  que el cemento Portland<sup>16</sup> y, dependiendo de la relación Si/Al del material de origen, se obtendrán cementantes con diversas propiedades y aplicaciones (Figura 9).

Clasificación	Estructura del monómero	Aplicación
Polisialato Si:Al = 1:1	Mn-(Si-O-Al-O)-n	*Aislamiento Térmico. *Resistencia al fuego.
Polisialato-siloxo Si:Al = 2:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O)-n	*Refractarios para la fundición de aluminio *Cementos de Alto rendimiento *Residuos tóxicos *Compuestos resistentes al Fuego
Polisialato-disiloxo Si:Al = 3:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)-n	*Compuestos resistentes al fuego *Materiales útiles para su uso en el rango de temperatura 650-1000 ° C.

Figura 9. Aplicaciones del geopolímero en función de su relación Si/Al.<sup>17</sup>

Los geopolímeros poseen ciertas características que los hacen un material idóneo para la construcción.<sup>18, 19, 20</sup>

- Bajo índice de agrietamiento en el fraguado (< al 0,05%)
- 2 GPa en su módulo de Young
- Calor específico de 0,7 a 1,0 J/Kg °C
- Supercementos: Elevada resistencia temprana después de 24 horas (120 Mpa)
- Conductividad al calor: 0,2 a 0,4 W/m °C

15 Davidovits, Geopolymers Chemistry and Applications (2008), ed.J. Davidovits, Institut Geopolymere, Saint-Quentin, France.

16 Provis, J.L. Duxson P., and van Deventer, J. S. J., (2007), "Geopolymer technology and the search for a low-CO2 alternative to concrete" In AIChE Annual Meeting, Salt Lake City, United States, American Institute of Chemical Engineers, November 4-9.

17 Davidovits J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials.

18 A. Palomo, A. Macías, M. T. Blanco and F. Puertas, Proceeding of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, India, 1992, vol. 5, p. 505.

19 Fernández-Jiménez y Palomo, 2003, Fernández-Jiménez et al., 2006-1, Van Jaarsveld et al., 2003, Khale y Chaudhary, 2007, Hardjito et al., 2004, Catafamo et al., 1997, GEOASH project

20 Davidovits, J. 1994. Properties of geopolymers cements. In: P. V. Krivenko (Eds.). Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Kiev, Ucrania. 131-149.

- Expansión (mortero a los 90 días) de 0,03% (en morteros de CPO la expansión alcanza el 1%)

Respecto a este material, la Administración Federal de Carreteras, Agencia Federal dependiente del Departamento de Transporte de Estados Unidos, publicó en marzo de 2010 un TechBrief titulado “Geopolímero” donde se declara: “La producción de cementos-geopolímeros es versátil y rentable. El que pueda ser mezclado y curado esencialmente como cemento Portland representa una importante evolución, un nuevo paradigma que está revolucionando el desarrollo de la infraestructura y la industria de la construcción”.

En este caso es posible encontrar empresas que suministran el producto comercial:

- Reino Unido (R.U.) comercializa el banah UK banahCem™ como cemento geopolímero.
- Australia comercializa su Zeobond E-Crete™ como hormigón geopolímero.

### *c. Una combinación de ambas estructuras con al menos un 20% de Calcio*

El estudio de este material se encuentra aún en sus inicios y no existen, por el momento, datos de referencia contrastados. Sin embargo, puede ser la puerta a una nueva alternativa dentro de los cementantes verdes.

## **Conclusión**

En las mezclas comerciales habituales, denominadas erróneamente Cementos Verdes o Ecológicos, se sigue contemplando al CPO como material base en todos los diseños. No se trata, por tanto, del empeño en la búsqueda de una solución al problema medioambiental que supone la Industria de la Construcción, lo que determina la finalidad de dichos estudios y avances tecnológicos, sino la búsqueda de una mejora técnica del material predilecto, CPO, acompañada de mayor rentabilidad en su producción.

Finalmente, en la era de la Tercera Revolución Industrial o Tercera Revolución Científico-Técnica (RCT) y del Cambio Climático, cada paso dado puede ser medido en CO<sub>2</sub>-equivalentes. Los resultados obtenidos hasta el momento en la mejora de cemento común son irrefutables, positivos para el Sector Construcción y la Ingeniería Civil, pero no son lo suficientemente significativos para el planeta.

Para alcanzar la meta de un futuro con construcciones sostenibles es necesario centrar esfuerzos en el desarrollo de materiales verdaderamente ecológicos que se rijan, de igual manera, por los estándares de calidad que marca la norma internacional.

## Referencias

- Davidovits J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. August 1991. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 37(8):1633-1656.
- Davidovits, J. (1993). *Emerging Technologies Symposium on Cement and Concretes in the Global Environment* (Portland Cement Association).
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymers cements. In: P. V. Krivenko (Eds.). *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*. Kiev, Ucrania. 131-149.
- Davidovits, (2008). *Geopolymers Chemistry and Applications*, ed. J. Davidovits, Institut, Geopolymere, Saint-Quentin, France.
- Denkstatt, consultora independiente en desarrollo sostenible (n.d.). <http://denkstatt-group.com>
- Escalante, J.I., L.Y. Gómez, K.K Johal, G Mendoza, H Mancha, J Méndez (2001). Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions, *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Issue 10, pp. 1403-1409.
- Geopolymer concrete, TechBrief, -US Department of transportation, (March 2010) Federal highway Administration, FHWA-HIF-10-014.
- Humphreys, K. and M. Mahasenan (2002) "Climate Change" in *Toward a Sustainable Cement Industry*. Battelle-World Business Council for Sustainable Development.
- Laboratorio de Ingeniería Sostenible (2010). Huella Ecológica del Cemento, p. 183.
- Lawrence, C.D. (1997). The production of low energy cements. *Leas's Chemistry of Cement and Concrete*. 4<sup>th</sup> edn, Arnold, London, 421-474.
- Mineral Resources Program (USA), <https://minerals.usgs.gov/>
- Palomo, A., A. Macías, M. T. Blanco and F. Puertas, (1992). *Proceeding of the 9<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, New Delhi, India, 1992, vol. 5, p. 505.
- Provis, J.L Duxson P., and van Deventer, J. S. J., (2007), "Geopolymer technology and the search for a low-CO<sub>2</sub> alternative to concrete" In *AIChE Annual Meeting*, Salt Lake City, United States, American Institute of Chemical Engineers, November 4-9.
- Puertas F. (1993). Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *Mater Construcción*; 43:37-48.

- (2008) *Quantifying Greenhouse Gas Emissions from Key Industrial Sectors in the United States*, U.S. EPA, May 2008, Chapter 1, p. 7.
- Shi C., Krivenko P.V., Roy D.M. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. doi:10.4324/9780203390672.
- Tufekci, M., A. Demirbaş, H. Genç (1997). Evaluation of steel furnace slags as cement additives, *Cement and Concrete Research*, Volume 27, Issue 11, pp. 1713-1717.

