

Cementos Alcalinos: Materiales de Construcción Ecológicos

Alkaline Cements: Ecological Building Materials

Nancy Montes Valencia¹

Fecha de recepción: Junio 3 de 2014

Fecha de aceptación: Septiembre 29 de 2014

Resumen

La preocupación actual es la mitigación y el control de las fuentes de contaminación ambiental provenientes de la actividad industrial, particularmente el sector de la construcción en lo que respecta a la obtención del cemento Portland ordinario (CPO), una de las grandes productoras de CO₂. Por lo tanto, se constituye en un desafío la producción de un cemento alternativo o alcalino que sea menos contaminante con el medio ambiente. En este artículo se habla sobre la necesidad de la sostenibilidad de las ciudades, el proceso de obtención del CPO y del cemento alcalino, así como las condiciones para la producción de este último.

Palabras clave: contaminación, medio ambiente, cemento Portland ordinario, cemento alcalino.

Abstract

Nowadays there is a concern about mitigation and control of environmental pollution sources from industrial activity, being the construction sector especially the obtaining of the Portland ordinary cement (POC) ones of the major producers of CO₂. Therefore It is a challenge the production of an alternative cement or alkaline that is less polluting

¹ Docente-investigadora. Grupo Qualipro- Facultad de Producción y Diseño. IU- Pascual Bravo. Ingeniera Química, MSc. Ciencias-Química. nmontes@pascualbravo.edu.co

with the environment. This paper has been written with different aspects like: the need of sustainability of cities, the process of obtaining of the OPC and alkaline cement, so the conditions to produce the alternative cement.

Keywords: pollution, environment, ordinary Portland cement, alkaline cement.

1. Introducción

El calentamiento global es ocasionado por la emisión de gases efecto invernadero y es uno de los grandes problemas de la sociedad. Precisamente, el dióxido de carbono (CO_2) es uno de los principales gases que producen el efecto invernadero y la principal fuente de emisión es la actividad industrial que incluye: la generación de energía, la producción de hierro y acero, la fabricación del cemento, la producción de petróleo, gas natural y el respectivo proceso de refinamiento ^[1, 2].

La industria cementera ha comenzado a tomar medidas para reducir las emisiones de gases contaminantes, principalmente el CO_2 ; se encuentra reportado que la producción de cemento contribuye aproximadamente con el 7% de las emisiones globales totales de CO_2 ^[3]. La reducción de las emisiones de este gas permite seguir las directrices del Acuerdo de Copenhague realizado en el año 2009, debido al alto impacto ambiental asociado a la producción del cemento Portland ordinario (CPO) que incluye: altas emisiones de gases contaminantes (CO_2 , SO_2 y NO_x), alto consumo de energía tanto térmica como eléctrica y explotación de recursos minerales ^[4, 5].

Sin embargo, es indudable que el cemento Portland ordinario (CPO) ha sido uno de los más grandes avances tecnológicos del hombre, ya que sin este no hubiera sido posible la reconstrucción y establecimiento de muchas ciudades en el siglo XXI. El CPO es el ingrediente fundamental del concreto, su composición es una combinación químicamente controlada de calcio, silicio, aluminio y hierro ^[6]. Por ejemplo, los países que produjeron la mayor cantidad de cemento a nivel mundial en el año 2012, fueron: China, India y Estados Unidos con un valor en millones de toneladas de 2150, 250 y 74, respectivamente ^{[7], [8]}.

La comunidad científica internacional ha investigado sobre el diseño de nuevos cementantes alternativos, que reemplacen el CPO, para aportar a la protección del medio ambiente y al mismo tiempo encontrar un material con mayor durabilidad que el cemento Portland ordinario ^[9]. El CPO tiene proble-

mas de durabilidad relacionados con sus propiedades intrínsecas, como su alta permeabilidad que admite la entrada de agua y otras sustancias agresivas que se absorben en el concreto, ocasionando problemas de carbonatación y corrosión ^[10].

Existen varias clases de cementos alternativos o verdes, uno de estos es el sulfoaluminato de calcio (SAC), que fue desarrollado en China en los años 70, por la Academia de Materiales de Construcción, para fabricar tubos de cemento. Este material fue producido al añadir yeso al clinker de SAC y posteriormente pasarse a una molienda para obtener un mejor tiempo de fraguado, desarrollo de fuerza y estabilidad de volumen del producto final. Otra materia prima empleada en su elaboración es la piedra caliza, cuya cantidad es más baja que la requerida por el cemento Portland ordinario, reduciéndose las emisiones de CO₂. Sin embargo, las emisiones de SO₂ son significativamente más altas al compararse con las producidas en el CPO ^[11].

Otro nuevo tipo de cemento alternativo es el híbrido, que utiliza materiales cementantes suplementarios (MCs) para reducir la producción de CO₂ proveniente de la reacción de calcinación. Este cemento se forma cuando los MCs son mezclados con el cemento ordinario Portland. Los MCs adicionales son: piedra caliza y compuestos puzolánicos naturales o artificiales y subproductos industriales ^[12]. Aunque el subproducto más usado es la ceniza volante, porque es relativamente abundante, si es agregada en cantidades muy altas produce inconvenientes, como un lento fraguado y compresión temprana baja ^[13].

Sin embargo, existe un cemento verde más promisorio que los tratados anteriormente debido a sus propiedades y bajo impacto ambiental, denominado cemento alcalino o geopolimérico. El desarrollo de este material es ambientalmente sostenible, porque utiliza como materia prima subproductos y residuos industriales (escoria siderúrgica de alto horno, ceniza volante de carbón, metacaolín, sílica geotérmica, lodos metalúrgicos), requieren menos consumo de energía que el CPO (la obtención de 1 tonelada de concreto geopolimérico es casi 990 MJ, en tanto que la misma cantidad de OPC está cercana a 3630 MJ) y las emisiones de dióxido de carbono se reducen significativamente: 1 tonelada de CPO emite aproximadamente 1 tonelada de CO₂ a la atmosfera ^[9], mientras que 1 tonelada de cemento geopolimérico genera la sexta parte (0.184 toneladas de CO₂) ^[14].

Los países que más han utilizado esta tecnología emergente en proyectos de infraestructura son China y la Unión Soviética ^[15, 16]. En los últimos años, Australia ha incursionado por los incentivos financieros y políticos al disminuir las emisiones de CO₂ ^[17].

Una aplicación de este material inorgánico, fue realizada por Lone Star Industries Inc., la empresa líder del cemento en Estados Unidos en ese momento, que fundó en 1983 la empresa filial PYRAMENT, la cual se dedicaría a la implementación y desarrollo de un nuevo cemento formado por un geopolímero inorgánico y polímeros orgánicos. La formulación del cemento geopolimérico se mejoró con la adición de escoria siderúrgica de alto horno, porque aceleró el tiempo de fraguado y mejoró la resistencia a la compresión. El concreto obtenido fue usado como un material de reparación de un pavimento donde se movilizaba tráfico pesado ^[18].

Estos cementos alternativos exhiben mejores propiedades mecánicas y fisicoquímicas que el OPC, como baja densidad, micro-porosidad o nanoporosidad, retracción despreciable, alta resistencia a la compresión, estabilidad térmica, alta dureza de superficie, mayor resistencia química y microestructura muy densa, ^[19, 20, 21].

2. Hacia la sostenibilidad

El desarrollo sostenible es un término que tiene muchas definiciones, la más común dice que la población de hoy no debería comprometer la habilidad de las generaciones futuras para suplir sus necesidades. El desarrollo sostenible tiene tres fundamentos: económico, protección ambiental y desarrollo social ^[22].

El aumento en la población humana, el consumo de energía y la contaminación que producen las ciudades son aspectos críticos ^[23], por tanto surge el concepto de ciudad sostenible la cual debe proporcionar alta calidad de vida a sus habitantes sin afectar las condiciones de los habitantes de zonas aledañas ^[24].

Los centros urbanos están constituidos por edificios, estas estructuras tienen un alto impacto en el cambio climático ambiental porque son responsables de casi el 40% del consumo de energía primaria y 70% del consumo

de electricidad. Por consiguiente, existe una creciente tendencia en muchas ciudades del mundo hacia el diseño y construcción de edificios verdes, los cuales deberían tener ciertas características, y durante su ciclo de vida contribuir a la conservación de los recursos (energía, tierra, agua y materiales), reducción de la contaminación, mejoramiento de la calidad del entorno interior y protección ambiental ^[25].

Las ciudades verdes deben adoptar gradualmente el concepto de cero emisiones, lo que contribuirá no solo al desarrollo sostenible sino a la reducción de la huella de carbono (es una medida para la contribución de las organizaciones a ser entidades socialmente responsables y un elemento más de concienciación para la asunción entre los ciudadanos de prácticas más sostenibles) ^[26]. Esto significa que la mayor parte de los residuos producidos en la ciudad deberían ser reciclados para la producción de materiales secundarios que pueden tener varias aplicaciones incluyendo la construcción.

3. Reacción química de geopolimerización para la producción del cemento alcalino

Los cementos alcalinos usualmente consisten en un componente cementante (fuente de aluminosilicatos) y un activador con una alta concentración alcalina, los activadores usados son álcalis cáusticos o sales alcalinas.

El resultado es una pasta que puede fraguar y endurecer como el cemento Portland ordinario, pero difieren en que exhiben mayor fuerza mecánica que los cementos convencionales y resisten más el fuego ^[27].

La reacción química que produce este cemento alternativo se denomina geopolimerización, el cual es un complejo proceso multifase que involucra una serie de reacciones en paralelo las cuales son ^[28]:

- Disolución del silicio y aluminio del material aluminosilicato en la solución acuosa fuertemente alcalina.
- Formación de especies oligómeros.
- Policondensación de los oligómeros para formar una estructura aluminosilicato tridimensional.
- Endurecimiento del sistema en una estructura polimérica sólida, esta etapa de solidificación es análoga a aquella observada en la síntesis de

zeolitas, estas se definen como una familia de sólidos cristalinos micro-porosos con estructuras bien definidas, que contienen silicio, aluminio y oxígeno, la mayoría se forman naturalmente y otros son sintéticos ^[29].

Una característica importante es que de acuerdo con la selección del material y a las condiciones del proceso pueden presentar una amplia variedad de propiedades y/o usos como: alta resistencia a la compresión, baja retracción, resistencia a los ácidos, estabilidad térmica, durabilidad química a largo plazo que lo perfila como un potencial cementante para la inmovilización de residuos tóxicos y nucleares, tecnología cerámica y aplicaciones prefabricadas ^[30].

4. El proceso de manufactura del CPO

El concreto es el material de construcción más comúnmente usado y es la segunda sustancia de consumo global después del agua ^[31].

El concreto se forma cuando el cemento es mezclado, con arena, grava y agua, no obstante como se ha tratado anteriormente, la producción del cemento afecta negativamente al medio ambiente.

Para la fabricación del cemento Portland existen dos procesos: el seco y el húmedo. Pero en la actualidad, cerca del 90% de las industrias cementeras utilizan el proceso seco porque no consume energía adicional en el secado del material de partida. La materia prima (material calcáreo, arcilla) es extraído de la mina y requiere una trituración primaria para reducir el tamaño, posteriormente se envía a una trituración secundaria o a un molino de martillos para otra reducción de tamaño ^[3].

Este material es llevado a hornos rotatorios cilíndricos de acero, donde alcanza una temperatura aproximada de 1400°C al entrar en contacto con llamas producidas por combustión controlada de polvo de carbón, petróleo o gas natural. En este paso es liberada la mayor cantidad de CO₂ debido a la reacción de calcinación de la caliza CaCO₃ (el principal componente del material calcáreo) y a la combustión de hidrocarburos para el calentamiento del horno.

Culminado este proceso se forma una nueva sustancia denominada clinker (pseudo cristales de Ca, Si, Al, Fe) que tiene forma de pequeñas esferas y es enfriado en un sistema de aire forzado. Finalmente, el clinker es molido en

un molino de bolas, para obtenerse el cemento Portland cuya textura es un polvo muy fino que tiene la capacidad de retener agua, en esta etapa final se le adiciona un poco de yeso, para regular el tiempo de fraguado del concreto [32], ver Fig. 1.

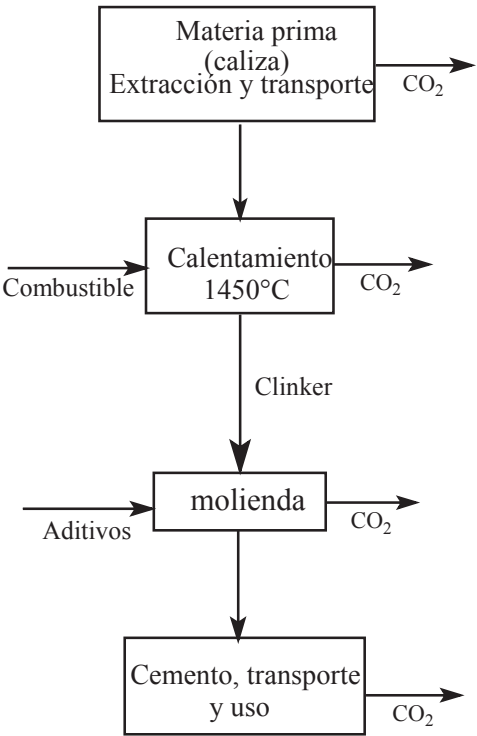


FIGURA 1. Proceso de elaboración del cemento ordinario Portland (CPO).

5. El proceso de obtención del cemento alternativo geopolímero

Un geopolímero es un material aluminosilicato tridimensional de estructura amorfa a cristalina con enlaces poliméricos Si-O-Al-O, como se observa en la Fig. 2. Se forma como el producto de la reacción química denominada geopolimerización, donde óxidos aluminosilicatos (provenientes de escoria granulada, zeolita, metacaolín, ceniza volante de carbón y ceniza volcánica) reaccionan bajo condiciones altamente alcalinas, en la presencia de hidróxidos alcalinos y solución de silicato [33]. Este proceso se muestra en la Fig. 3.

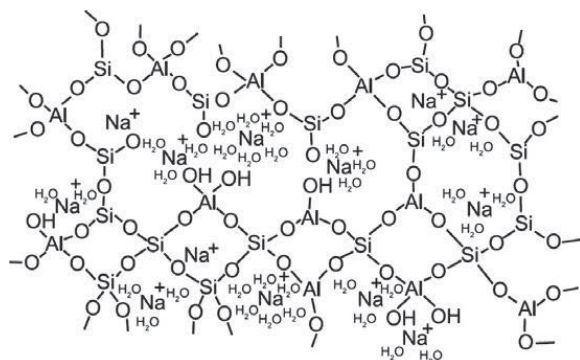


FIGURA 2. Modelo estructural del geopolímero o cemento alcalino, fuente: kvara et al, “aluminosilicate polymers – influence of elevated temperatures, efflorescence”, *Journal Ceramics Silikaty*, vol. 53, pp. 276-282, 2009.

Existen modelos descriptivos para explicar la reacción de geopolimerización, que consiste en cuatro etapas: destrucción, coagulación, condensación y cristalización. La primera es el paso principal por su doble función, en esta son liberadas las especies (silicato y aluminato) del material de partida y, al mismo tiempo, la disolución se encarga de activar la superficie para que ocurran las reacciones cementantes que contribuyen a la fuerza final de la estructura.

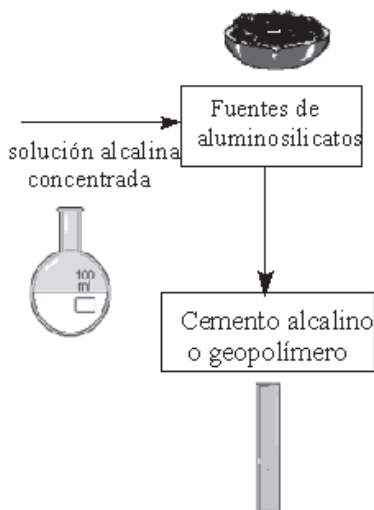


FIGURA 3. Diagrama para la obtención del cemento alternativo o geopolímero.

6. Materia prima para la producción del cemento alcalino

Para entender la cinética se han realizado estudios basados en diferentes estructuras y técnicas experimentales, como la microscopía electrónica o la calorimetría, pero no se conocen valores para las constantes de velocidad; tampoco es muy clara la composición o naturaleza química exacta de las especies formadas en las etapas de la reacción ^[34,35].

Como se había indicado, la materia prima debe contener óxidos aluminio silicatos que pueden ser de origen natural o artificial. A continuación se expondrán algunos materiales usados en la obtención de los cementos alcalinos.

6.1 Producción de alúmina

La alúmina se obtiene por medio del proceso Bayer, cuando 5 toneladas de bauxita (roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por óxido de aluminio ^[36] producen dos toneladas de metal aluminio.

Observándose que el rendimiento de la alúmina es baja y que se obtienen grandes cantidades de residuo, cuyo nombre es lodo o fango rojo, se caracteriza por ser altamente alcalino (pH=10), por lo tanto es evacuado y dispuesto en enormes vertederos. Este material podría causar los siguientes problemas ambientales ^[37]:

- Contaminación de las superficies y las fuentes de agua subterráneas.
- Contacto directo con flora y fauna.
- Evaporación que causaría lluvias básicas.

Los mayores productores de este residuo son Australia, Guinea y Brasil ^[38], siendo un reto el adecuado reuso de este material, por consiguiente existen estudios y tratamientos semi-industriales para buscar usos a este fango rojo, incorporándolo a materiales de construcción, cerámica tradicional, clinker, cemento y concreto. La aplicación más reciente es como materia prima para la producción de compuestos geopoliméricos, para ser utilizado como material de construcción o en restauración de construcciones ^[37]. Como es requerida una fuente de silicato, se debe agregar metacaolín, escoria siderúrgica de alto horno, residuos de la construcción y demolición, o hacer uso de fuentes naturales como: ceniza volcánica, ceniza volante, puzolanas y piedras volcánicas.

6.2 Cenizas volantes

Las cenizas volantes son residuos sólidos provenientes de la combustión de materiales como el carbón, la madera, la incineración de residuos sólidos urbanos y procesos de fundición ^[39, 40].

Desde la década del 50 el uso principal que se le ha otorgado a las cenizas volantes es en la industria del cemento y del hormigón ^[41], principalmente en la construcción de obras civiles, muros de embalses, arrecifes coralinos artificiales, entre otros ^[42].

Aunque este material está disponible en abundancia en todo el mundo, no existe un equilibrio entre la cantidad producida y su consumo, lo que ha ocasionado preocupaciones con el medio ambiente debido a problemas de disposición de este residuo ^[43].

Al material remanente se le aplican algunos mecanismos para eliminarlo como: estanques, lagunas, vertederos, montones de escoria, los cuales representan un uso no productivo de la tierra, potencial peligro de contaminación de las aguas subterráneas y carga financiera para las empresas por el mantenimiento de estos sitios de disposición ^[40].

7. Variables y parámetros

En investigaciones previas se ha encontrado que el tiempo de reacción, la temperatura, la composición y concentración del medio alcalino (solución activante), la relación Si/Al y el tamaño de partícula de la materia prima afectan las velocidades de dilución y precipitación de aluminosilicatos amorfos y el desempeño mecánico del geopolímero ^[44].

Una variable que incide muy fuertemente es la solución activante, la cual puede ser de dos tipos: hidróxidos alcalinos y silicatos disueltos en el activador básico. Dependiendo del tipo de activador alcalino se obtendrá una determinada composición del producto final y por consiguiente diferentes propiedades mecánicas. Una de estas propiedades es la resistencia a la compresión, definida como una medida primaria de la utilidad de un material usado en diferentes aplicaciones en la industria de la construcción, porque es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento ^[45].

Los estudios reportan que la síntesis de un geopolímero con silicato en solución presenta mayor resistencia a la compresión, que cuando se utiliza una solución activante alcalina ^[46]. Los silicatos disueltos en la solución activante tienen una química más compleja que los activadores tipo hidróxidos alcalinos, lo que implica una mejor comprensión de las fases que se forman durante el proceso.

De otro lado, la adición de silicio soluble en el activante alcalino modifica la relación Si/Al en el material de partida que forma el gel aluminosilicato, notándose que existe una estrecha relación entre el tipo de solución activante y la microestructura del geopolímero ^[47].

En cuanto a las soluciones alcalinas, estas aportan el grupo ión OH^- que actúa como un catalizador de la reacción, y el metal catiónico alcalino interviene como un elemento formador de la estructura para balancear la carga negativa de la configuración del aluminio tetraédrico. Se ha demostrado que el NaOH posee una capacidad más alta que el KOH para liberar monómeros de silicato y aluminato de la fuente de aluminosilicatos. Como consecuencia, los cationes de sodio tienen mejores capacidades de zeolización en la formación de polímeros, posiblemente porque son más pequeños que los cationes potasio y por consiguiente migran más fácilmente a través de la red de gel húmeda ^[48].

Otra variable a tener en cuenta es el agua, porque juega un significativo papel durante la disolución, policondensación y etapas de endurecimiento de la geopolimerización y por lo tanto el contenido de esta es un parámetro crucial en la síntesis de los geopolímeros, basados en ceniza volante y metacaolín porque influye en el desarrollo de la fuerza mecánica. Particularmente, el metacaolín se caracteriza por tener una superficie muy alta y un tamaño de partícula muy pequeño, significando que demanda mucha cantidad de agua, hecho que puede causar dificultades relacionadas con la retracción por secado y agrietamiento ^[49].

Es importante mencionar que la velocidad de la reacción de activación depende de la distribución del tamaño de partícula, ya que una activación mecánica (como una molienda más fina) se reflejará en una mejor activación química porque el medio alcalino entrará en contacto con mayor facilidad con los materiales aluminosilicatos ^[50].

La composición del material de partida también afecta la velocidad de reacción, encontrándose que ante la falta de aluminio este se incorpora dentro de una solución para controlar la velocidad, la estequiometría y la prolongación de las fases reaccionantes ^[51].

8. Limitaciones del cemento geopolimérico

Los cementos alcalinos se pueden producir a partir de fuentes naturales o artificiales con diferentes condiciones de activación alcalinas, dichas variables inciden fuertemente en las características del cementante geopolimérico. Precisamente, el alto precio de los activadores y la incontinua disponibilidad de la materia prima han limitado en parte su implementación como un remplazo del OPC ^[19].

De otro lado, existen vacíos en los estudios mecanísticos de la geopolimerización y en la naturaleza química exacta del material geopolimérico, aspectos que deben ser conocidos para que exista un control absoluto del desarrollo microestructural, porque juega un papel importante al determinar las propiedades mecánicas del geopolímero y permitiría diseñar geopolímeros con aplicaciones específicas. Por tanto, es necesaria más investigación sobre dichos temas para que este cemento alternativo sea aceptado como un sustituto del OPC ^[52, 53].

9. Conclusiones

Aunque la tendencia de la industria cementera es impactar de una forma menos negativa al medio ambiente, la producción del Cemento Ordinario Portland sigue en aumento, siendo uno de los grandes productores de CO₂ a nivel mundial.

Los cementos alternativos son durables y ambientalmente sostenibles, no obstante hacen falta muchos estudios sobre su mecanismo de formación, composición química exacta y condiciones de reacción para que puedan reemplazar al Cemento Ordinario Portland en diferentes aplicaciones.

Son pocos los estudios sobre la rehabilitación de estructuras de concreto con cementos geopoliméricos, debido a que la mayoría de los grupos de investigación están en el campo de la ciencia de los materiales y no en el de la

ingeniería civil, evidenciándose un vacío que requiere la pronta integración de esta área del conocimiento de una forma interdisciplinaria.

10. Referencias

- [1] P. Bertier, R. Swennen, B. Laenen, D. Lagrou, R. Dreesen, "Experimental identification of CO₂–water–rock interactions caused by sequestration of CO₂ in Westphalian and Buntsandstein sandstones of the Campine Basin (NE Belgium)", *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 89, n° 1-3, pp. 10-14. 2012.
- [2] R. Bruant, A. Guswa, M. Celia, C. Peters, "Safe storage of CO₂ in deep saline aquifers", *Environmental science & technology*, vol. 36, pp. 240a-245a., 2002.
- [3] J. Deja, A. Uliasz-Bochenczyk, E. Mokrzycki, "CO₂ emissions from Polish cement industry", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, pp. 583–5888. 2010.
- [4] F. Puertas, A. Barba, M. F. Gazulla, M. P. Gómez, M. Palacios, S. Martínez, "Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en La fabricación de clínker de cemento portland: caracterización y activación alcalina", *Materiales de Construcción*, vol. 56, n° 281, pp. 73-84, 2006.
- [5] J. Van Deventer, J. Provis, P. Duxson, "Technical and commercial progress in the adoption of geopolimer cement", *Minerals Engineering*, vol. 29, pp. 89-104, 2012.
- [6] E. Vasconcelos, S. Fernández, J. L. Barroso de Aguiara, F. Pacheco-Torgal. "Concrete retrofitting using metakaolingeopolymer mortars and CFRP", *Construction Building Materials*, vol. 25, pp. 3213–3221, 2011.
- [7] N. Madloul, R. Saidur, M. Hossain, N. Rahim. "A critical review on energy use and savings in the cement industries", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2042–60, 2011.
- [8] U.S. Geological Survey. *Mineral commodity summaries*. Disponible en: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>.
- [9] F. Pacheco, J. Castro, S. Jalali. "Alkali-activated binders: A review, Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products". *Construction and Building Materials*, vol. 22 pp.1305–1314, 2008.
- [10] O. E. Gjorv, "Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment", ACI Concrete International, 1994.
- [11] C. Shi , A. Fernández, A. Palomo, " New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement", *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 750-763, 2011.

- [12] M. S. Imbabi, C. Carrigan, S. McKenna. "Trends and developments in green cement and concrete technology", *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 1, pp.194–216, 2012.
- [13] S. Donatello, C. Kuenzel, A. Palomo, A. Fernández, "High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 73, pp. 53– 63, 2013.
- [14] M.C Nasvi, P.G. Ranjith, J. Sanjayan, "The permeability of geopolymer at down-hole stress conditions: Application for carbon dioxide sequestration wells", *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1391–1398, 2013.
- [15] P.V. Krivenko, Alkaline cements, in: P.V. Krivenko (Ed.), "Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes", VIPOL Stock Company, Kiev, Ukraine, pp. 11–129, 1994.
- [16] H. Xu, J.L. Provis, J.S.J. Van Deventer, P.V. Krivenko, "Characterization of aged slag Concretes", *ACI Materials Journal*, vol. 105, pp. 131–139, 2008.
- [17] J. S. J. VAn Deventer, J. L. Provis, P. Duxson, D.G. Brice, "Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials", *Waste Biomass Valoriz*, vol. 1, nº1, pp. 145–155, 2010.
- [18] J. Davidovits. "30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs", Conference Geopolymer, October 28-29, Melbourne, Australia, pp.1-16, 2002.
- [19] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, "Sustainable cement production-present and future", *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 642-650, 2011.
- [20] J. L. Provis, C. Yong, P. Duxson, J. Deventer, "Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers", *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical Engineering Aspects*, vol., 336, pp. 57–63, 2009.
- [21] P. Lemougna, U. F. Melo, M. Delplancke, H. Rahier, "Influence of the activating solution composition on the stability and thermo-mechanical properties of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash", *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 278–286, 2013.
- [22] S. Egger, "Determining a sustainable city model". *Environmental Modelling & Software*, vol. 621, pp.1235-46, 2006.
- [23] United Nations Centre for Human Settlements Cities in a globalizing world global report on human settlements. Disponible en: http://www.un.org/en/events/pastevents/pdfs/Cities_in_a_globalizing_world_2001.pdf, 2001.

- [24] P. Higgins, J. M. Campanera, “(Sustainable) quality of life in English city locations”, *Cities*, vol. 28, n° 4, pp. 290-299, doi: 10.1016/j.cities.2011.02.005., 2011.
- [25] C. Jingwei, Z. Ping, W. Xue, “The Research on Sino-US Green Building Rating System”, *Energy Procedia*, vol. 5, pp. 1205-1209, 2011.
- [26] Qué es huella de carbono. Disponible en: <http://www.huellacarbono.es/apartado/general/huella-de-carbono.html>.
- [27] V. Deventer, J. Provis, P. Duxson, “Technical and commercial progress in the adoption of geopolimer”, *Cement Mineral Engineering*, vol. 29, pp. 89-104, 2012.
- [28] C. Rees, J. L. Provis, G. Lukey, J. Deventer, “The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation”, *Colloids and Surfaces A: Physico-chemica. Engineering*, vol. 318, pp. 97-105, 2008.
- [29] ¿Qué es zeolita? Disponible en: <http://emmexico.com/zeoponiaem.pdf>
- [30] Z. Zhanga, J. L. Provis, H. Wanga, F. Bullen, A. Reid, “Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers Part 2, Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin”, *Thermochimica Acta*, vol. 565, pp. 163- 171, 2013.
- [31] G. Habert, J. B. d’Espinose de Lacaillerie, N. Roussel, “An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 1229-1238, 2011.
- [32] America’s cement manufacturers, How cement is made, Disponible en: <http://www.cement.org/basics/howmade.asp>.
- [33] C. Li, H. Sun, L. Li, “A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements”, *Cement and Concrete Research*, vol., 40, pp. 1341-1349, 2010.
- [34] G. Kovalchuk, A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, “Review: Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II”, *Fuel*, vol. 86, n° 3, pp. 315-322, 2007.
- [35] C. Rees, J. L. Provis, G. Lukey, J. Deventer, “The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation”, *Colloids and Surfaces A: Physico-chemica Engineering Aspects*, vol. 318, pp. 97-105, 2008.
- [36] “Bauxita”. Disponible en: <http://www.ecured.cu/index.php/Bauxita>.
- [37] W. Hajjaji, S. Andrejkovic`ova, C. Zanelli, M. Alshaaer, M. Dondi, J. A. Labrincha, F. Rocha, “Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud”, *Materials and Design*, vol. 52, pp. 648-654, 2013.

- [38] “Equipos de tratamiento de minerales de aluminio”. Disponible en: <http://www.trituradorasdemandibula.com/Equipo-de-cantera/de-tratamiento-de-minerales-de-aluminio.html>.
- [39] N. Moreno, “Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. Aplicaciones ambientales”, Departamento de Ingeniería de Minas y Recursos Minerales, Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- [40] R. S. Iyer, J. A., Scott, “Power station fly ash — a review of value-added utilization outside of the construction industry”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 31, pp. 217–228, 2001.
- [41] X. Querol, J. C. Umaña, F. Plana, A. Alastuey, A. López, A. Medinaceli, A. Valero, M. J. Domingo, E. García, “Synthesis of zeolites from fly ash at pilot plant scale. Examples of potential applications”, *Fuel*, vol. 80, pp.857-865.
- [42] ECOBA, European Coal Combustion Products Association. Disponible en: <http://www.ecoba.com>.
- [43] N. Ranjbar, M. Mehrli, A. Behnia, U. Johnson, M. Zamin, “Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar”, *Materials and Design*, vol. 59, pp. 532–539, 2014.
- [44] K. Komnitsas, D. Zaharaki, V. Perdikatsis, “Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers”, *Journal Hazardous Materials*, vol. 161, pp.760-768, 2009.
- [45] I. Lecomte, C. Henrist, M. Liégeois, F. Maseri, A. Rulmont, R. Cloots, “(Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement”, *Journal European Ceramic Society*, vol. 26, pp. 3789–3797, 2006.
- [46] G. S. Ryu, Y. B. Lee, K. T. Koh, Y. S. Chung, “The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators”, *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 409–418, 2013.
- [47] C. Villa, E. T. Pecina, R. Torres, L. Gómez. “Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite”, *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 2084–2090, 2010.
- [48] M. M. Radwan, L. M. Farag, S.A. Abo-El-Enein, H.K. Abd El-Hamid, “Alkali activation of blended cements containing oil shale ash”, *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 367–377, 2013.

- [49] J. J. Thomas, A. J. Allen, H. M. Jennings. "Density and water content of nanoscale solid C–S–H formed in alkali-activated slag (AAS) paste and implications for chemical shrinkage", *Cement and Concrete Research*, vol. 42, pp. 377–383, 2012,
- [50] F. Collins, J. G. Sanjayan, "Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 1401- 1406, 2000.
- [51] C. Ruiz, A. Fernández, J. Skibsted, A. Palomo, "Clay reactivity: Production of alkali activated cements", *Applied Clay Science*, vol. 73, pp. 11–16, 2013.
- [52] J. L. Provis, J.S.J. Van Deventer, "Direct measurement of the kinetics of geopolymerization by in-situ energy dispersive X-ray diffractometry", *Journal of Material Science*, vol. 42, pp. 2974-2981, 2007.
- [53] A. Hajimohammadi, J. L. Provis, J. S. Van Deventer, "The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation", *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 210–216, 2011.