

Materials de arcilla geo-polimerizada: Tecnologías para la arquitectura del futuro

Calderón-Peñafiel J.C.^{a b c}, Rosell J.R.^{a b}, Avellaneda J.^{a c}

^a Departamento de Tecnología de la Arquitectura, ^b Laboratorio de Materiales, ^b Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB), ^c Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona. ^a Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Campus Sud, Barcelona, Spain.
arq.juancarlosalderon@gmail.com

Este artículo tiene la intención de exponer de manera sintética y a modo de resumen el trabajo de investigación presentado en la *Jornada de Doctorado del programa de Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo* de la *Universitat Politècnica de Catalunya*. La arcilla es el material más utilizado en la historia de la arquitectura, pese a ello, no ha sido posible dotarla de características resistentes comparables a las del hormigón a base de cemento Portland mediante estrategias de “estabilización” convencional. Esta investigación se enfocó en el estudio de materiales experimentales de arcilla polimerizada mediante procedimientos análogos a la “geopolimerización”. El propósito principal fue probar si los materiales de arcilla polimerizada podrían utilizarse como materiales de construcción que cumplan requerimientos mecánicos y ambientales modernos. Como objetivos complementarios se planteó: comparar el comportamiento de diferentes tipos de arcilla, diferentes tipos de activador alcalino, diferentes proporciones y procedimientos de fabricación, optimizar las variables que intervienen en la fabricación del material tomando en cuenta la resistencia a compresión simple final y la energía incorporada. El estudio se desarrolló en dos partes: la primera enfocada en la revisión bibliográfica y la segunda en una campaña experimental. Como resultado se obtuvieron probetas de arcilla polimerizada resistente al agua con altas resistencias a compresión (20-30 MPa) y menor impacto ambiental que materiales convencionales de uso masivo como el ladrillo cerámico. Se confirmó la viabilidad de implementación de materiales a base de arcilla polimerizada en el futuro de la arquitectura y la construcción.

Palabras clave: arcillas, tierra, aluminosilicatos, geopolímeros, materiales.

1. Introducción

Los polímeros (geo-polímeros) a base de arcillas son materiales fabricados con procedimientos análogos a los de geopolimerización. “Geopolimerización” es el término utilizado para hacer referencia a la reacción química que se produce al mezclar aluminosilicatos con activadores alcalinos concentrados (o menos frecuentemente con ácidos), comúnmente hidróxidos y/o silicatos alcalinos, con lo cual se obtiene una nueva red molecular polimérica formando materiales denominados “geopolímeros” [1].

El término “geopolímero” fue acuñado por el científico Joseph Davidovits y empezó a utilizarse en la década de 1970. Existen diferentes tipos de geopolímeros: los más estudiados hasta la fecha han sido fabricados a partir de cenizas volantes [2] escorias de alto horno [3], metacaolín [4] y otras materias primas ricas en aluminosilicatos altamente reactivos [5]. Los geopolímeros son materiales que presentan características sobresalientes en cuanto a su resistencia mecánica, resistencia al fuego y resistencia a agentes corrosivos. Investigaciones sobre impacto ambiental [6] demuestran que los geopolímeros son una alternativa a materiales con

gran cantidad de energía incorporada [7] como es el caso del hormigón a base de cemento Portland, que es el material de construcción más utilizado en el mundo [8].

Para la fabricación de geopolímeros la materia prima comúnmente utilizada está compuesta por aluminosilicatos, o sea materiales ricos en alúmina (Al_2O_3 , óxido de aluminio) y sílice (SiO_2 , óxido de silicio). Es preferible que los aluminosilicatos se encuentren en una fase amorfa reactiva y constituyan más del 70% de la composición del material precursor, debido a que estos elementos desempeñan un papel importante como fuente de iones Al^{3+} y Si^{4+} [9].

Por otro lado, la arcilla es el aglomerante más utilizado en la historia de la humanidad: el Departamento de Energía de los Estados Unidos estima que más de la mitad de la población mundial vive en casas de arcilla sin cocer construidas con tecnologías vernáculas (adobe, tierra apisonada, bahareque, etc.) [10].

El atractivo de la arcilla natural como material de construcción radica en su bajo impacto ambiental, su

disponibilidad y sus características. El lado negativo está marcado por la baja resistencia que comúnmente adquiere en comparación con materiales procesados (ladrillos de arcilla cocida, concreto a base de cemento Portland, cerámica, etc.). Esta es la principal razón por la que adolece de una imagen deficiente, no cumple con algunos estándares de productividad y calidad, no pasa muchas de las pruebas de durabilidad y requerimientos técnicos superados por materiales industriales. Además, las estructuras a base de arcilla natural comúnmente requieren un alto mantenimiento ya que son propensas a la erosión bajo la lluvia, al fácil deterioro de sus superficies, al agrietamiento ante pequeños esfuerzos de tracción y/o compresión y a un crítico comportamiento ante acciones dinámicas en zonas sísmicas: pueblos enteros han sido destruidos por inundaciones y terremotos.

En la mayoría de países industrializados la arcilla sin cocer es un material de construcción poco frecuente. En los países en vías de desarrollo poco a poco se reemplaza la construcción con arcilla natural por prácticas constructivas emuladas de los países desarrollados, principalmente porque la arcilla está vinculada con la pobreza [11]. En el ámbito de la arquitectura existe la creencia generalizada de que la arcilla es un material completamente explorado y superado pero en realidad es uno de los materiales menos estudiados y menos entendidos [12].

La búsqueda de estrategias para dotar a los materiales a base de arcilla de características más resistentes se remonta a la prehistoria. Productos como la orina, la sangre, el estiércol, la goma arábiga, el jugo de agave, el betún natural, la caseína proveniente de la leche, las fibras vegetales y animales, la arena, el yeso, la cal, las cenizas, las puzolanas, etc. [13] son ejemplos de algunos “estabilizantes” de arcilla utilizados empíricamente por constructores.

Recientemente la problemática ambiental ha volcado el interés científico hacia el estudio de mecanismos de estabilización de la arcilla para su utilización como material de construcción “moderno”. Investigaciones sobre la influencia de agregados de plantas y fibras, mezclas con cal, diferentes mezclas de estabilizantes alternativos, cenizas, adición de cemento, metacaolín, residuos industriales, etc. son muestra de un gran abanico de estudios llevados a cabo en los últimos años. En este contexto los “estabilizadores” de la arcilla de uso más frecuente son el cemento, la cal y el betún, que comúnmente se agregan en proporciones que van del 5 al 15% en peso [14]. El cemento es el “estabilizante” más utilizado aunque estudios recientes no recomiendan su empleo y

evidencian problemas inherentes a compatibilidad e impacto ambiental [15].

La resistencia a la compresión se ha considerado a menudo la característica mecánica más importante de los materiales de construcción [16], por tanto el principal desafío ha sido y sigue siendo el uso de la menor cantidad de energía para la obtención de materiales más resistentes. Un estudio realizado en 2015 [17] recoge datos de diferentes estrategias de “estabilización” de arcilla: los resultados muestran que puede adquirir resistencias a la compresión que oscilan entre 0,39 MPa para bloques sin estabilizar y 6,5 MPa para bloques estabilizados con un 20% de cemento. Esto demuestra que la resistencia a compresión simple obtenida con materiales a base de arcillas “estabilizadas” mediante estrategias convencionales está muy por debajo de la resistencia a la compresión estándar del hormigón a base de cemento Portland (20 MPa o más).

En la actualidad la combinación de técnicas de análisis (DRX, SEM, FRX, TG, ADL, etc.) hace posible caracterizaciones químico-estructurales mucho más precisas de las partículas de cristales individuales de arcilla, estando aún lejos de conocer por completo la compleja estructura físico-química [18]. De todos modos, estos avances han permitido el desarrollo de tecnologías alternativas: procesos microbiológicos [19], nanotecnología [20] geopolimerización [21] activación alcalina [22], etc. y se han convertido en herramientas que han definido los nuevos horizontes en el desarrollo de los materiales a base de arcilla. De hecho, los minerales de arcilla empiezan a ser entendidos como “nanomateriales naturales” con gran potencial para dispersarse como partículas de unidades de tamaño nanométrico en fases poliméricas, formando nuevos materiales ‘nanocompuestos’ con propiedades termomecánicas superiores [23].

La posibilidad de utilizar diferentes fuentes de aluminosilicatos en la fabricación de geopolímeros ha propiciado el estudio de materiales precursores alternativos. En el caso de las arcillas generalmente se parte de un proceso previo de alteración térmica que amplifica las características reactivas naturales del material, tal como sucede con el metacaolín (caolín calcinado a más de 500°C). También se ha demostrado que los suelos puzolánicos tratados con soluciones alcalinas dan como resultado materiales similares a los geopolímeros a base de metacaolín, debido a las elevadas temperaturas a las que la materia prima fue expuesta por actividad volcánica [24].

Objetivos:

La geo-polimerización de arcillas naturales presenta desafíos, sobre todo porque los aluminosilicatos presentes en las arcillas son poco reactivos en comparación a los aluminosilicatos presentes en cenizas volantes o metacaolín, y porque existen diferentes tipos de arcilla que difieren en composición química y mineralógica, lo cual complejiza el problema. Los estudios sobre "geopolímeros" de arcilla natural son relativamente recientes pero aportan información relevante sobre: el proceso de polimerización en las arcillas, la influencia del ratio alúmina/sílice, la concentración de hidróxidos alcalinos y/o el comportamiento de Na y K.

A diferencia de estudios previos el propósito principal de esta investigación fue probar si las arcillas, sin ser sometidas a un proceso de deshidroxilación previo o a uno posterior de alteración por "calcinación", pueden ser utilizadas mediante procedimientos análogos a la geopolimerización para la fabricación de materiales de construcción que cumplan requerimientos mecánicos y ambientales modernos.

Como objetivos secundarios se plantearon: comparar el comportamiento de diferentes tipos de arcilla, diferentes tipos de activador alcalino, diferentes proporciones y diferentes procedimientos de fabricación. También se planteó optimizar las variables que intervienen en la fabricación del material, tomando en cuenta la resistencia a compresión simple y el impacto medioambiental, para finalmente plantear posibles aplicaciones y usos en la arquitectura.

A continuación se describen y se justifican los procedimientos aplicados a esta investigación, los resultados generales y las conclusiones.

2. Metodología y materiales

El desarrollo del trabajo se dividió en dos partes: la primera etapa fue la revisión del estado del arte y la segunda el diseño y desarrollo de la campaña experimental.

La revisión del estado del arte, en la primera parte, incluyó un análisis del rol de la arcilla en la historia de la arquitectura y las estrategias tradicionales de estabilización. En segundo lugar se estudiaron los minerales de arcilla (clasificación, composición, estructura atómica, etc.) con el objetivo de comprender las características del material para

aplicar los principios de geo-polimerización. En tercer lugar se incluyó un estudio sobre geopolimerización: antecedentes históricos, terminología, estructura, rol de los aluminosilicatos y los activadores alcalinos, proceso de síntesis, mecanismos de reacción, impacto medioambiental, etc. Finalmente, el estudio se enfocó en las investigaciones sobre geopolimerización de arcillas, se recogieron criterios rectores y experiencias determinantes para el diseño y desarrollo de la campaña experimental. Esta última se desarrolló teniendo como referencia la normativa española vigente.

Materiales:

La arcilla fue utilizada como material base, conglomerante principal y como fuente de aluminosilicatos inorgánicos. Se escogieron cuatro tipos de arcilla (suministradas por *Argiles Colades S.A.* del sector de *La Bisbal d'Empordá*, Girona-Barcelona) con los siguientes nombres comerciales: Arcilla BEIG PEN/F, Arcilla ROJA, Arcilla LILA y Caolín MD-25.

Las arcillas fueron caracterizadas mediante los siguientes análisis: determinación del límite líquido, determinación del límite plástico, análisis por difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TG), análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), análisis granulométrico (ADL) y análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

La arena se utilizó como relleno, mejoró la trabajabilidad de la mezcla y aportó indirectamente sílice al polímero. La arena utilizada fue suministrada por *Àrids per a la Indústria i la Depuració, S.L.*-Barcelona (arena sílice (Standard) L-105115).

Como solvente principal se utilizó agua desionizada suministrada por Adesco S.A. (Barcelona). Los activadores alcalinos utilizados fueron hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y silicato de sodio suministrado por LabKem (Barcelona). También se hicieron algunas pruebas utilizando óxido de calcio (CL-90Q suministrado por Cales de Pachs S.A. Barcelona) como estabilizante adicional.

Diseño experimental:

Para el diseño de experimentos fue necesario considerar como variables los materiales precursores (arcilla, arena, agua y los diferentes aditivos alcalinos), las condiciones de fabricación (característica y tiempo de amasado) y las condiciones de curado (temperatura y tiempo).

El diseño de experimentos se dividió en dos partes. La primera parte constituyó una etapa de experimentación piloto basada en datos recolectados del estado del arte: en esta etapa se realizaron 66 mezclas y se fabricaron 198 probetas. El objetivo principal de los ensayos preliminares fue tener un primer acercamiento al comportamiento de los materiales precursores ante diferentes mezclas con activadores alcalinos, disminuir el nivel de incertidumbre, observar la trabajabilidad del material y finalmente analizar la influencia de las variables en la resistencia a compresión simple del material compuesto.

Los experimentos de la segunda etapa se diseñaron a partir de los resultados obtenidos en la primera etapa y se dividieron en seis campañas, con un total de 106 mezclas y 319 probetas fabricadas. Para el diseño de experimentos (*DOE*) de cada una de estas etapas se usó el software *Minitab17*. La intención de cada campaña fue determinar el valor óptimo de las diferentes variables que intervienen en la resistencia a compresión simple del material.

Elaboración de probetas:

Los procedimientos experimentales, los equipos y los materiales variaron según cada experimento. De todos modos el procedimiento general se dividió en tres etapas: primero la preparación de los activadores alcalinos; segundo la preparación del polímero en donde intervinieron principalmente los materiales precursores, el activador alcalino y en algunos casos aditivos; finalmente la etapa de curado en la que algunas probetas fueron expuestas a temperatura (80°C-100°C) y luego almacenadas bajo condiciones ambientales. Los equipos utilizados pueden dividirse en dos grupos: por un lado están las máquinas (amasadora automática, estufa y agitador magnético) y, por otro, equipos básicos de laboratorio (recipientes, moldes, utensilios, etc).

Caracterización de geo-polímeros de arcilla:

Todas las probetas fabricadas bajo diferentes condiciones y dosificaciones, tanto en la primera como en la segunda parte experimental, fueron ensayadas a flexión y compresión simple. Además, con el objetivo de determinar las propiedades del material optimizado, se realizaron varios análisis de caracterización: difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TG), análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), porosimetría de mercurio, porosidad, densidad aparente y densidad relativa, succión capilar, permeabilidad al vapor de

agua, módulo de elasticidad dinámico (MOE), resistencia mecánica, durabilidad, lixiviación y comportamiento térmico.

3. Resultados y conclusiones

Las probetas experimentales de arcilla polimerizada alcanzaron resistencias a compresión simple entre 20 y 30 MPa (dependiendo de cada mezcla). Los resultados demostraron que el material optimizado es resistente al agua. Un análisis de ciclo de vida determinó que el impacto ambiental de la fabricación de probetas experimentales a base de arcilla polimerizada es menor que el impacto de ladrillos de arcilla cocida.

Los resultados detallados serán expuestos en el documento final de tesis. Esta es una investigación en fase “alfa”, por tanto es importante señalar que los resultados obtenidos no pueden considerarse una panacea, más bien constituyen un aporte al desarrollo científico al reducir el nivel de incertidumbre y abrir futuras líneas de estudio que ayuden a la optimización de la tecnología y a su aplicación en la arquitectura.

A modo de conclusión se puede decir que los minerales de arcilla natural, sin tratamientos previos de deshidroxilación o tratamientos posteriores de cocción a alta temperatura, pueden ser utilizados como materiales precursores fuente de aluminosilicatos en la fabricación de materiales polimerizados mediante tecnologías análogas a la geopolimerización.

Se concluyó que los diferentes tipos de arcilla se comportan de manera distinta ante el mismo tipo de activación alcalina. Esto prueba que no existe una formulación universal aplicable a todas las arcillas, sino que cada tipo de arcilla requiere un diseño de mezcla específico para una correcta polimerización.

Por otro lado, se concluye que:

- La adición de pequeños porcentajes CaO, a pesar de ser prescindible su utilización, aporta al incremento de la resistencia y consolidación del polímero.
- El uso de silicato de sodio es prescindible ya que esto aminora el impacto medioambiental del material.
- La exposición a 80°C durante 4-24 horas favorece el proceso de polimerización sin representar una carga energética que penalice sustancialmente el material en comparación a materiales de uso

masivo, que requieren temperaturas superiores a 1000°C (como derivados del cemento Portland o los mampuestos cerámicos).

- Es posible fabricar polímeros a base de arcilla a temperatura ambiente mediante el uso de estabilizantes adicionales que funcionen como agentes defloculantes, como por ejemplo hexametáfosfato sódico y/o “captadores” de agua (por ejemplo la “cal viva”).
- Para la fabricación de geopolímeros a base de arcilla es posible usar diferentes activadores alcalinos y diferentes métodos de fabricación. La elección de los materiales de partida y los procesos utilizados influirán en la resistencia al agua y en el comportamiento mecánico.

Finalmente se concluye que los materiales de arcilla polimerizada podrían constituir una alternativa tecnológica coherente con la realidad ambiental y con los desafíos a los que se encara la arquitectura del nuevo milenio. Las características del material abren varias posibilidades en cuanto a su aplicación en elementos constructivos: mampuestos, piezas prefabricadas de diferente formato, elementos estructurales, materiales de impresión 3D, etc.

Referencias.

- [1] Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- [2] Lahoti, M., Wong, K. K., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2018). Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure. *Materials and Design*, 154, 8–19. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.023>
- [3] Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Villegas, R., Arroyo, F., Vilches, L., & Fernández-Pereira, C. (2018). Carbon fiber waste incorporation in blast furnace slag geopolymer-composites. *Materials Letters*, 233, 1–3. <http://doi.org/10.1016/J.MATLET.2018.08.099>
- [4] Selmani, S., Sdiri, A., Bouaziz, S., Joussein, E., & Rossignol, S. (2017). Effects of metakaolin addition on geopolymer prepared from natural kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 146(June), 457–467. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.019>
- [5] Hwang, C. L., & Huynh, T. P. (2015). Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.025>
- [6] Collins, F. G., Turner, L. K., & Collins, F. G. (2017). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e)
- emissions : A comparison between geopolymer and OPC cement concrete and OPC cement concrete. *Construction & Building Materials*, 43(January 2013), 125–130. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- [7] Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2017). *Handbook of Low Carbon Concrete*. Butterworth-Heinemann. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128045244>. p.195.
- [8] Hendriks, Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (2004). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry, 1–11. Retrieved from <http://www.wbcsdcement.org/pdf/tf1/prghgt42.pdf>
- [9] Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629. <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>. p. 597
- [10] Avrami, E., Guillaud, H., & Hardy, M. (2008). *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. (A. Escobar, Ed.). Los Angeles: Institute, The Getty Conservation. Retrieved from https://getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/terra_lit_review.pdf#page=34
- [11] Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- [12] Morel, J. C., Aubert, J. E., Millogo, Y., Hamard, E., & Fabbri, A. (2013). Some observations about the paper “earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction” by F. Pacheco-Torgal and S. Jalali. *Construction and Building Materials*, 44, 419–421. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.054>
- [13] Minke, G. (2001). *Manual de construcción en tierra : la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura tradicional*. Montevideo : Nordan-Comunidad. Retrieved from http://catalog.upc.edu/record=b1323040~S1*catpp.47-59.
- [14] Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). A geotechnical perspective of raw earth building. *Acta Geotechnica*, 12(3), 463–478. <http://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>
- [15] Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). Earth concrete . Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research Journal*.

-
- [16] Aubert, J. E., Maillard, P., Morel, J. C., & Al Rafii, M. (2015). Towards a simple compressive strength test for earth bricks ? Towards a simple compressive strength test for earth. *Materials and Structures*, (APRIL).
<http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4641.4242>
- [17] Alam, I., Naseer, A., & Shah, A. A. (2015). Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Construction and Building Materials*, 77, 154–159.
<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>
- [18] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). General introduction: Clays, clay minerals, and clay science. *Developments in Clay Science*, 5, 1–19.
<http://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00001-8>. p 1.
- [19] Achal, V., Mukherjee, A., Kumari, D., & Zhang, Q. (2015). Earth-Science Reviews Biomineralization for sustainable construction – A review of processes and applications. *Earth Science Reviews*, 148, 1–17.
<http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>
- [20] F. Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. N. and C.-G. G., & Oxford. (2013). *Nanotechnology in eco-efficient construction*. (Woodhead Publishing Limited, Ed.).
- [21] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK.
<http://doi.org/10.1533/9781845696382>
- [22] Pacheco-Torgal, F. (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. United Kingdom: Woodhead Pub.
- [23] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *Handbook of clay science*. Elsevier., p. XX
- [24] Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., & Melo, U. F. C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, 37(8), 3011–3018.
<http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.002>