







Geopolymerization: Eco-efficient paste made with recycled concrete

Alexander Vega Anticona, Dr. ¹; Jimmy Montenegro-Alvarado, MSc. ²; Karol Malásquez-Sagastegui, MSc. ³; Randall Gutiérrez-Chilca, Msc. ⁴, Aldo Roger Castillo Chung ⁵; Danny Chávez Novoa, Msc. ⁶; César Arévalo-Aranda, Dr. ⁷*

^{1,6}Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe; dchavez@unitru.edu.pe

^{2,3,4,7}Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, jimmy.montenegro@upn.edu.pe; karol.malasquez@upn.edu.pe; randall.gutierrez@upn.edu.pe

⁵Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe

*Corresponding author: cesar.arevalo@upn.edu.pe; Av. Ejército 920, Trujillo, Phone 044 606222

Abstract– In the present investigation, pastes from recycled concrete powder (RCP) with a particle size of 75 μm (200 mesh) were alkaline activated at different concentrations of alkaline solution (AS) in the order of 4M, 6M, 8M and 10M NaOH, which were compared with a paste made with ordinary Portland cement (OPC). For the preparation of the specimens, a ratio of SA/ PCR = 0.18 was used, which were cured at room temperature for 24 hours, then the curing was continued in an oven at 40°C for 72 hours and later the curing was completed up to 7 days at room temperature. The PCR was obtained from the pulverized concrete specimens tested at the Composite Materials Laboratory of the School of Materials Engineering - UNT. With respect to the compressive strength (CR) tests, values of 10.26 MPa, 10.75 MPa, 13.66 MPa, 25.53 MPa and 30.10 MPa; for the 4M, 6M, 8M and 10M concentrations of NaOH respectively, which represents increases of 5%, 33%, 149% and 193% with respect to the value of the CPO pastes, for the bulk density values the tendency was to increase with the increase of the NaOH concentration, being the highest value of 2123 kg/m³, for the specimen elaborated with a 10 M NaOH SA, which represents an increase of 24% with respect to the value of the CPO pastes. All the samples were evaluated by stereoscopy, from these observations it is concluded that the increase of the NaOH concentration decreases the apparent porosity of the pastes; the pastes after being tested by compression were pulverized and characterized by FTIR, the spectra allowed to determine that, in the range of wave number from 700 to 1500 cm⁻¹ Si-O stretching from the SiO₄ tetrahedra is observed, at 870 cm⁻¹ the vibrations of -CO₃ becoming CaCO₃ are observed, at 930 cm⁻¹ the formation of hydrated calcium silicate gels (CSH) is observed, and above 3645 cm⁻¹ the O-H stretching vibration of portlandite is observed.

Keywords– Geopolymerization, compressive strength, concrete pastes, sodium hydroxide

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Geopolimerización: Pasta ecoeficiente fabricada con concreto reciclado

Alexander Vega Anticona, Dr. ¹; Jimmy Montenegro-Alvarado, MSc. ²; Karol Malásquez-Sagastegui, MSc. ³; Randall Gutiérrez-Chilca, Msc. ⁴; Aldo Roger Castillo Chung ⁵; Danny Chávez Novoa, Msc. ⁶; César Arévalo-Aranda, Dr. ⁷

^{1,6}Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe; dchavez@unitru.edu.pe

^{2,3,4,7}Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, jimmy.montenegro@upn.edu.pe; karol.malasquez@upn.edu.pe; randall.gutierrez@upn.edu.pe

⁵Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe

*Corresponding author: cesar.arevalo@upn.edu.pe; Av. Ejército 920, Trujillo, Phone 044 606222

Resumen– En la presente investigación se elaboraron pastas provenientes de polvo de concreto reciclado (PCR) con una granulometría de 75 μm (malla 200) activadas alcalinamente a diferentes concentraciones de solución alcalina (SA) en el orden de 4M, 6M, 8M y 10M de NaOH, las cuales fueron comparadas con una pasta elaborada con cemento Portland ordinario (CPO). Para la elaboración de las probetas se realizó una relación de SA/ PCR = 0.18, las cuales fueron curadas a temperatura ambiente durante 24 horas, luego se continuó el curado en horno a 40°C durante 72 horas y posteriormente se terminó el curado hasta los 7 días a temperatura ambiente. El PCR se obtuvo del pulverizado de probetas ensayadas de concreto del Laboratorio de Materiales Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales - UNT. Con respecto a los ensayos de resistencia a la compresión (RC), se reportaron los valores de 10.26 MPa, 10.75 MPa, 13.66 MPa, 25.53 MPa y 30.10 MPa; para las concentraciones 4M, 6M, 8M y 10M de NaOH respectivamente, lo cual representa incrementos del 5%, 33%, 149% y 193% respecto al valor de las pasta de CPO, para el caso de los valores de densidad aparente la tendencia fue a incrementar con el incremento de la concentración de NaOH, siendo el mayor valor de 2123 kg/m³, para la probeta elaborada con una SA de NaOH 10 M, el cual representa un incremento del 24% respecto al valor de las pastas de CPO. Todas las muestras fueron evaluadas mediante estereoscopio de estas observaciones se concluye que el incremento de la concentración de NaOH, disminuye la porosidad aparente de las pastas; las pasta después de ser ensayadas por compresión fueron pulverizadas y caracterizadas mediante FTIR, los espectros permitieron determinar que, en el rango de número de onda desde 700 a 1500 cm⁻¹ se observan estiramientos de Si-O provenientes de los tetraedros de SiO₄, a 870 cm⁻¹ se observan las vibraciones de -CO₃ convirtiéndose en CaCO₃, a 930 cm⁻¹ se observa la formación de geles de silicato de calcio hidratado (CSH), superior a 3645 cm⁻¹ se aprecia vibración de estiramiento O-H de la portlandita.

Palabras claves– Geopolimerización resistencia a la compresión, concreto reciclado, hidróxido de sodio

I. INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales de construcción con mayor uso en diversas aplicaciones de la ingeniería debido a su versatilidad y relativo bajo costo; así por ejemplo se utilizan en

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

nuevas construcciones, remodelaciones, restauración de una gran variedad de sistemas de construcción, aplicaciones como las mencionadas obligan al uso de las mezclas de cemento en grandes cantidades, esto por otro lado genera una gran cantidad de residuos sólidos de mezclas de cemento (pastas, morteros y concretos, entre otros), siendo el más abundante en volumen el concreto. El cemento Portland ordinario (CPO) se usa como aglomerante en la fabricación en las mezclas de cemento en especial del concreto; por otro lado es sabido que la producción de CPO no solo consume una cantidad significativa de recursos naturales y energía, sino que también libera una cantidad de gases de efecto invernadero, en particular el CO₂; así por ejemplo para producir 1 tonelada de CPO, se necesitan alrededor de 1,5 toneladas de materia prima y se libera 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera [1, 2].

En la elaboración del concreto se utiliza además del cemento, arena, agregados, agua y de ser necesario aditivos. Las operaciones de explotación de canteras para producir arena y agregados consumen mucha energía además de generar diversos tipos de residuos [3]. La escasez de recursos naturales utilizados como materiales de construcción, genera que estos sean trasladados largas distancias, generando un mayor costo de los mismos [4]. La creciente conciencia medioambiental, la necesidad de garantizar la sostenibilidad de los materiales de construcción y la preocupación pública por conservar tanto los espacios verdes como los paisajes naturales de nuestras regiones, limitan la explotación de nuevas canteras y alientan por lo tanto a la industria de la construcción a buscar alternativas a los clásicos materiales de construcción [5].

Por otro lado, es un gran desafío manejar la gran cantidad de concreto reciclado que se generará a partir de obras de construcción, demolición y/o restauración de la infraestructura que así lo requiera; por ejemplo, en los Europa, los residuos de concreto ocupan un tercio del volumen de materiales de desecho en los vertederos, además, encontrar áreas aptas para vertederos es cada vez más difícil y eliminar cada vez es más caro [6]. Por lo tanto, diferentes agencias fomentan el reciclaje de concreto reciclado y varias instituciones lo buscan. Aunque se ha llevado a cabo una amplia investigación, el reciclaje actual de residuos de concreto todavía se limita predominantemente al uso de agregados de concreto en aplicaciones de baja

responsabilidad estructural, como capa de base y relleno no estructural, y el resto aún se deposita en vertederos [7]. Cuando se tritura el concreto reciclado, una cierta cantidad de pasta/mortero de cemento del concreto original permanece adherida a las partículas de piedra en el agregado de concreto; esta es la razón principal de la menor calidad del agregado de concreto reciclado en comparación al agregado natural; además el agregado de concreto reciclado tiene una mayor absorción de agua, menor densidad aparente, menor gravedad específica, menor resistencia a la abrasión, mayor capacidad de trituración y mayor cantidad de partículas de polvo [8]. La baja calidad del agregado de concreto reciclado genera concreto con menores propiedades de resistencia, durabilidad y contracción; por ello la utilización de agregados de concreto reciclado en concreto estructural es muy limitada [9]. En los casos en el agregado de concreto reciclado se utilice junto a agregados naturales para la producción de concreto estructural, normalmente se recomienda un límite del 30% para el agregado de concreto reciclado [8]. Se han desarrollado algunos métodos de refinación de agregados como el proceso de calentamiento y molienda mecánica para refinar la calidad de los agregados de concreto reciclado, pues tienen la intención de eliminar la pasta/morteros adheridos; pero estos métodos consumen mucha energía y producen finos adicionales que deben eliminarse [10].

Recientemente, diferentes grupos de investigación han estudiado un nuevo tipo de “cemento”, denominado geopolímero o polímero inorgánico [11].

El geopolímero es un material que se obtiene de la reacción de un aluminosilicato y una solución acuosa generalmente alcalina. La geopolimerización tiene ventajas sobre el CPO y ha sido de gran interés su estudio debido a que proporciona conocimientos técnicos que permiten dar uso a diversos residuos y convertirlos en nuevos cementos ecoeficientes los cuales pueden ser elaborados sin pasar por procesos que contaminan al medio ambiente y de esta manera evitar la generación de CO₂; se han utilizado diferentes fuentes de aluminosilicatos como residuos de vidrio [16], residuos de ladrillos de arcilla [17], cenizas [14], polvo de cerámica de azulejos [15], residuos de minería de oro [13], cenizas, residuos de minería de carbón y oro [14], así como de los morteros de cemento y restos de concreto reciclado [15], los cuales proporcionan fuente de sílice y alúmina, para producir geopolímeros [12].

Según diversos autores [17], manifiestan que la utilización de desechos industriales que contienen aluminosilicatos, mediante activación alcalina pueden proporcionar una salida para el creciente flujo de estos desechos, además de poder ser de alivio en los ya saturados vertederos; para ello realizaron ensayos de laboratorio de activación alcalina con NaOH en concentraciones de (4,8,12 y 16) M; los productos obtenidos fueron caracterizados mediante las técnicas de difracción cuantitativa de rayos X (QXRD), espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS), métodos basados en, disolución selectiva y pruebas de lixiviación. De los resultados obtenidos se puede mencionar que una mayor variedad de materiales de

desecho como lodo rojo, ceniza de cáscara de arroz y polvo de vidrio son adecuados para los precursores de los aluminosilicatos.

Otros investigadores [18], estudiaron la geopolimerización como alternativa a los productos cerámicos tradicionales mediante el desarrollo de un enfoque sostenible que evita el tratamiento térmico, en este caso se prepararon diversos experimentos trabajados en diversas condiciones (2 – 4 días de secado con 60 °C – 70 °C y 3 h de curado al vapor). El curado a vapor generó una resistencia a la flexión de 13,7 MPa y una capacidad de absorción de agua de 13,13% para baldosas de geopolímero. La mayor relación molar Si/Al de 5,78 generó la mejor resistencia a la flexión.

Se ha demostrado que la presencia de compuestos de calcio en la materia prima puede mejorar las propiedades mecánicas de los productos de geopolímero debido a la coexistencia de geles de silicato de calcio hidratado (CSH) e hidrato de aluminio y calcio (CAH) [19].

Según la investigación sobre geopolimerización de una mezcla de ladrillos de desecho (LD) finamente triturados y concreto reciclado (CR) en diferentes proporciones de mezcla (40%, 50%, 60%, 80% y 100% LD y lo restante al 100% fue completado con CR) demostró que con 100% de LD y con una relación de 0.30 agua/sólido se generó como resultado un aglutinante geopolimérico consistente con 33.75 MPa en un tiempo de fraguado final reducido en el rango de 100 a 125 minutos. En la investigación, la mezcla entre los agregados triturados y el aglutinante ya no es una preocupación, ya que el cemento endurecido que se encuentra adherido a los agregados triturados participa en la geopolimerización como fuente de silicio (Si) y calcio (Ca), esto mejoró la adherencia entre el nuevo ligante y sus precursores. La activación se realizó usando una solución de NaOH y silicato de sodio; para estudiar las propiedades mecánicas a nivel micro/nanoestructural y la composición de fase/elemental, en base a pruebas de compresión; así como caracterizaciones mediante barrido de electrones, microscopía/espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM/ EDX), difracción de rayos X (XRD) y análisis infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) [20].

En la presente investigación, se determinó la resistencia a la compresión y densidad aparente de pastas de concreto reciclado activados de forma alcalina mediante el uso de NaOH en diversas concentraciones (4M, 6M, 8M y 10M).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Los materiales usados en la investigación incluyen polvo de concreto reciclado (PCR), el cual fue reducido hasta una granulometría de 75 µm (malla 200). El PCR fue obtenido de muestras de probetas de concreto ensayadas por compresión del Laboratorio de Materiales Compuestos, de la Escuela de Ingeniería de Materiales, de la Universidad Nacional de Trujillo. La tabla I muestra la composición química del PCR

donde se evidencian la presencia de sílice, óxido de calcio y alúmina.

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL POLVO DE CONCRETO RECICLADO OBTENIDA MEDIANTE LA TÉCNICA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

Compuesto químico	%
SiO ₂	40.3
CaO	20.4
Al ₂ O ₃	9.7
Fe ₂ O ₃	3.4
H ₂ O	2.3
K ₂ O	2.2
MgO	2.1
Na ₂ O	1.7

La Fig. 1 muestra las micrografías ópticas del concreto reciclado apreciándose partículas de forma irregular con una superficie rugosa.



Fig. 1 Micrografía óptica de concreto reciclado con 2X de aumento

Para la obtención de la solución alcalina se utilizó a diversas concentraciones molares NaOH al 99% de grado reactivo, obtenido de la empresa Merck KGaA (Alemania), proveniente de Alemania, la composición química se detalla en la Tabla II.

B. Métodos Experimentales

B.1. Preparación de la solución de NaOH

Las soluciones alcalinas de NaOH se prepararon con agua desionizada a las concentraciones de 4M, 6M, 8M y 10M. Las soluciones alcalinas obtenidos se dejaron reposar 24 horas antes de ser utilizadas.

TABLE II
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL NaOH COMERCIAL PROPORCIONADA POR LA EMPRESA MERCK

Compuesto químico	%
NaOH	99
Na ₂ CO ₃	1
Cl	5 x 10 ⁻⁴
PO ₄	5 x 10 ⁻⁴
SiO ₂	1 x 10 ⁻³
SO ₄	5 x 10 ⁻⁴
N	3 x 10 ⁻⁴

B.2. Ensayo de compresión de pastas

El diseño de mezcla utilizado en la elaboración de pastas de PCR se muestra en la tabla III.

TABLE III
DISEÑO DE MEZCLA DE LAS PASTAS

Código	Concentración de NaOH (M)	PCR _{Sólido} (%)	NaOH _{Solución} (% w)
P-4MH	4	82	18
P-6MH	6	82	18
P-8MH	8	82	18
P-10MH	10	82	18

En la fig. 2 se muestra la secuencia experimental realizada desde la obtención de la materia prima (CR), hasta la obtención de las pastas en forma cilíndrica (25 mm * 50 mm, ASTM C39).



Fig. 2. Producción de probetas proveniente de pastas de concreto reciclado

En la elaboración de pastas se mantuvo constante la relación líquido: sólido, esta fue 0.18, cada nivel de estudio tuvo 5 repeticiones; el tiempo de amasado fue 5 minutos en todos los casos, las mezclas se colocaron en molde cilíndrico de acero estructural; el proceso de conformado se realizó por moldeo por compresión (3MPa) en todos los casos; los cilindros obtenidos mantuvieron la relación altura : diámetro de 2:1, según la norma ASTM C39; las pastas de forma cilíndrica obtenidos fueron secados a temperatura ambiente por un día, luego permanecieron 48 horas a 40°C, se dejaron enfriar en el interior de la estufa, para terminar el proceso de consolidación a temperatura ambiente hasta alcanzar los 7 días de haber sido obtenidas; en la Fig. 3 se muestran algunas de las muestras obtenidas

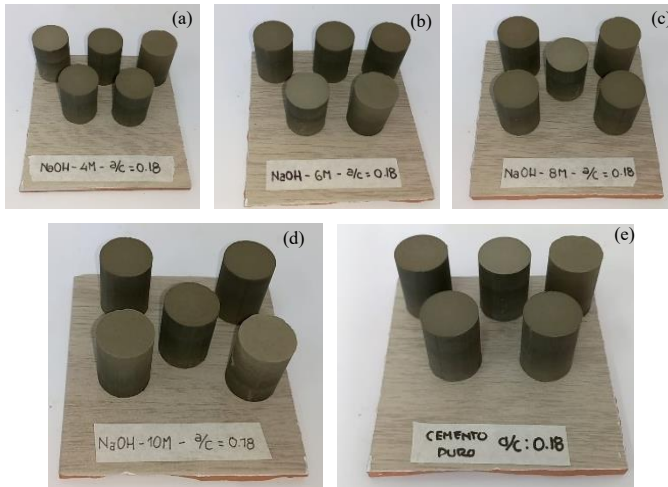


Fig. 3 Pastas de cemento con PCR a diferentes concentraciones de NaOH: (a) 4M, (b) 6M, (c) 8M, (d) 10M y (e) pasta de cemento puro

Cumplido los 7 días de haber conformado las muestras, están fueron ensayadas por compresión a una velocidad de carga de constante de carga de 1 KN/s y una precisión de $\pm 1\%$ (Maquina de ensayos universales Tecnotes – 60 Tn). En la Fig. 4. Se muestran algunos cilindros después de haber sido ensayadas a compresión



Fig. 4. Probetas elaboradas con PCR después del ensayo de compresión

B.3. Densidad aparente de pastas endurecidas.

Para determinar los valores densidad aparente se utilizó la relación entre la masa de cada cilindro y el volumen de los mismos, la toma de dato se realizó a 7 días de su elaboración. La ecuación utilizada se muestra a continuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde: ρ es la densidad, m es la masa y v es el volumen

B.4. Caracterización de las pastas

B.4.1. Microscopía Óptica.

Se utilizó la Microscopía Óptica para identificar las zonas de pasta, carbonatos y espacios vacíos o porosidades. El análisis de imágenes se realizó empleando un Estereoscopio de la marca Euromex, modelo EduBlue ED.1402-S. La evaluación microscópica se realizó después del ensayo de compresión, sin contaminar, la cual se utilizó para evaluar defectos de proceso de conformado como poros o espacios vacíos, tanto para las pastas de CPO, como las de PCR activados de forma alcalina, así como la posible composición de fase del material original

de PCR y el cambio debido al análisis con diferentes concentraciones del NaOH como activador alcalino.

B.4.2. FTIR-ATR (Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier).

El análisis FTIR-ATR se realizó para estudiar el efecto de las reacciones de geopolimerización en los enlaces químicos de los materiales antes y después de la reacción como los Si-O, -CO₃, C-O. Los espectros se obtuvieron empleando el equipo marca Perkin Elmer, modelo Spectrum TWO con rango de 400 a 4000 cm⁻¹.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Densidad aparente

Los resultados de la densidad aparente obtenida a diferentes concentraciones de NaOH (4M, 6M, 8M y 10M) de las pastas de PCR, se muestra en la Fig. 5; de ellas se puede apreciar que en el rango de 4M a 10M los valores de densidad aparente en las pastas elaborados con PCR son mayores que el CPO con incrementos del 7% y 24%, evidenciándose que a medida que se aumenta la concentración del NaOH en la pasta elaborado con PCR, también se incrementa la densidad aparente, esto se debió a que a que existe un incremento en la disolución de los óxidos de silicio y aluminio, a partir de PCR, y de esta manera se genera mayor densidad aparente de las probetas sometidas a ensayo;

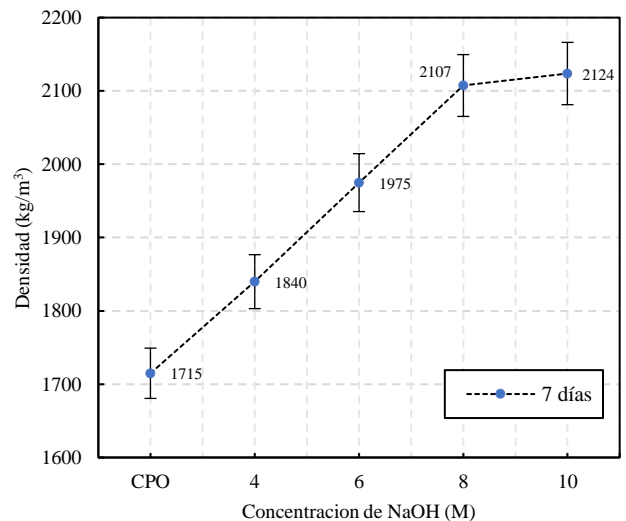


Fig. 5. Densidad aparente de pastas de PCR (7 días)

Otros investigadores, mencionan que el incremento en la densidad se originan una secuencia de transformaciones las cuales se dan en dos etapas y es cuando la solución alcalina y el PCR entran en contacto, liberándose calor y aparecen el primer mecanismo de transformación, donde el mecanismo de transformación corresponde a los procesos por los que los aluminatos presentes en la mezcla se disuelven y se produce la hidratación inicial de la pasta [21]. A continuación, el flujo de

calor disminuye hasta el segundo proceso, donde se origina el periodo de latencia. Durante este tiempo, los procesos continúan elevando la alcalinidad del medio hasta que alcanza la concentración de iones necesaria para que se produzca la reacción del C₃S. A continuación, se produce otro proceso, provocado por un aumento de la velocidad de emisión de calor originado por la formación del gel CSH a partir de la C₃S [22], ello se ve favorecido con el incremento de NaOH el cual al tener mayor cantidad de este compuesto va a permitir mejorar e incrementar las generaciones de los geles CASH y este producto hace que la pasta endurecida tenga menos porosidades y de esta manera incrementar la densidad de las pastas fabricadas con mortero reciclado.

El uso de áridos a partir de concreto reciclado (AR) minimiza la densidad del concreto, debido a la menor densidad de los áridos reciclados en comparación con los áridos convencionales. Una reducción en la densidad del concreto usado con AR entre un 4% y un 8% (que varía de 2165 a 2432 kg/m³) en comparación con el concreto de referencia que contiene agregados naturales [23]. Saloni, Yee & Thong afirmaron que la densidad se redujo entre un 6 y un 10 % (variando de 2160 a 2210 kg/m³) cuando se incorporó agregado de concreto reciclado (RCA); así mismo, señalaron que la densidad del mortero de geopolímero con RA fue un 29 % menor que la del mortero de control con agregado natural (AN) [24]. La caída de la densidad aparente fluctuó de 2,5 a 8,0 % para el mortero de geopolímero incorporado con AR en comparación con las muestras utilizadas con AN. La densidad aparente seca de la muestra de control fue de 1,84 g/cm³. La densidad de las muestras que contenían 25, 50, 75 y 100 % de AR fue de 1,95, 1,92, 1,88 y 1,84 g/cm³, respectivamente. En [25] prepararon bloques de hormigón ligero utilizando agregado de hormigón ligero reciclado (RLCA). Los reemplazos de cenizas volantes para el cemento portland ordinario (CPO) al nivel de 0, 5, 10 y 15% en peso redujeron efectivamente la densidad del bloque de hormigón. Para aplicaciones de hormigón ligero de baja resistencia (densidad de 1300 kg/m³ y resistencia a la compresión de 4,5 MPa), se encontró que la mezcla sin CPO (curado a 25 °C) era adecuada. la inclusión de CPO y el curado a temperatura enriquecieron hasta cierto punto la densidad y el desarrollo de la resistencia. Se obtuvo un concreto con una densidad de 1400 kg/m³ y una resistencia de 14,5 MPa a la sustitución óptima de CPO del 10 % y a la temperatura óptima de curado de 60 °C.

B. Ensayo de compresión

La Fig. 6 muestra los resultados de la resistencia a la compresión de las pastas de PCR a diferentes concentraciones de NaOH, para 7 días, para todos los casos, de la misma se puede apreciar que el incremento de la RC es proporcional a la concentración de NaOH; el valor máximo obtenido fue de 30.10 MPa correspondiente a la pasta elaborada con NaOH 10M, el cual representa un incremento de 193 % en comparación a la RC del CPO (10.26 MPa). El incremento de RC no fue lineal en cada tramo, evidenciándose velocidades de endurecimiento

variables: de 4M a 6 M del 27%, de 6M a 8M del 87% y de 8M a 10M un incremento del 18%.

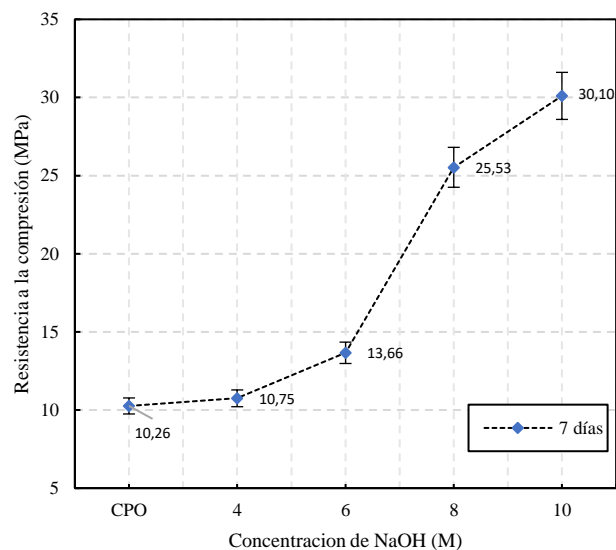
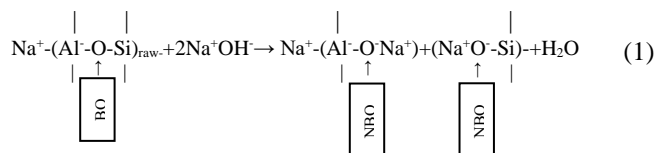


Fig. 6. Resultados de resistencia a la compresión obtenida a diferentes concentraciones de NaOH comparados con el CPO y a 7 días de curado

Los valores de resistencia a la compresión 10 M (NaOH), son más altos en comparación a las otras concentraciones de estudio; En [26] se indica que la concentración molar de NaOH es proporcional a los valores de resistencia a la compresión debido a que se incrementa la disolución de Si y Al, a partir de PCR y de esta manera se incrementa el grado compactación y la densidad aparente. La activación alcalina de los aluminosilicatos involucra la reacción química con el NaOH, en donde, el catión de Na⁺ desestabiliza y rompe los enlaces Al-O y O-Si, tal como se muestra en la ecuación (1); en la cual un oxígeno enlazado (BO) de la estructura del aluminosilicato es sustituido por dos átomos de oxígeno no enlazados (NBO) cargados negativamente, cuya carga es compensada por álcalis, lo que lleva al aislamiento del Si y Átomos de Al a través del siguiente esquema [27]:



La tendencia encontrada de los resultados es equivalente a los datos obtenidos en [20], los cuales concluyen que el incremento de NaOH disminuye el tiempo de fraguado e incrementa la resistencia a la compresión; los investigadores estudiaron la producción de material geopolimérico a partir de polvos de concreto y ladrillos de desecho triturados. Usaron NaOH en tres niveles diferentes, 6 %, 7 % y 8 % (en peso del aglutinante seco) [20].

C. Microscopia Óptica

La Fig. 7 muestra las micrografías ópticas de la muestra de CPO y las pastas de PCR activadas de forma alcalina con NaOH 4M, 6M, 8M y 10M, curada a temperatura ambiente. Las partículas de PCR están unidas por la fase vítrea o por el gel geopolimérico. La fase cristalina posiblemente se deba a una cristalización menor de las especies de aluminosilicatos [28].

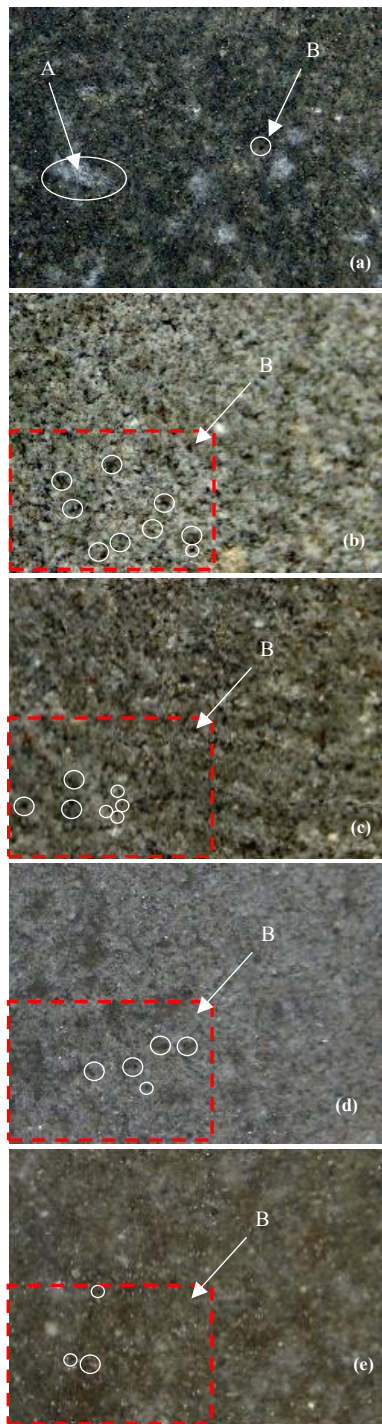


Fig. 7. Micrografías de pastas (2X). (a) CPO; (b) 4M, (c) 6M, (d) 8M, (e) 10M

La muestra de pastas de CPO Fig. 7 (a), se componen de cristales de carbonato (A) con una gama de distribuciones de tamaño y espacios vacíos o porosidades (B). En la Fig. 7 (b), (c), (d), (e) se evidencian que a medida que aumenta la concentración de NaOH de las pastas elaboradas con PCR las porosidades disminuyen (B). A bajas concentraciones de NaOH (4M y 6M), se observan mayor cantidad de poros, mientras que a altas concentraciones de NaOH (8M y 10M), se observan menor porosidad lo que le genera una mayor resistencia a la compresión [29]. Los materiales a base de PCR contienen algunas microfisuras inducidas por retracción, efectos térmicos, mecanismos nocivos o por carga mecánica [30].

B.1. Evaluación FTIR - ATR

La tabla IV muestra las bandas características IR para algunos enlaces característicos de productos de geopolimerización, donde se evidencia que entre los 700 cm^{-1} y 1500 cm^{-1} se les atribuye a las vibraciones de estiramiento Si-O de los tetraedros SiO_4 en los aluminosilicatos [20, 26]. Para el PCR, la banda alrededor de 930 cm^{-1} también se atribuye a las vibraciones de estiramiento Si-O de los tetraedros SiO_4 en el gel de silicato de calcio hidratado (CSH) [31, 32]. A 2350 cm^{-1} se aprecia vibraciones C-O en CO_2 limitadas en fase amorfa [34].

TABLA IV
BANDAS CARACTERÍSTICAS DEL INFRARROJO (IR) IDENTIFICADAS EN LAS PCR Y EN LAS MUESTRAS DE PCR ACTIVADOS ALCALINAMENTE MOSTRADAS EN LA FIG. 8.

Número de onda (cm^{-1})	Bandas características	Referencias
700 – 1500	Estiramiento Si-O de los tetraedros SiO_4	[20, 26]
870	vibraciones $-\text{CO}_3$ en CaCO_3	[31, 32]
930	Modo de vibración de estiramiento de Si-O (ν_3) en el gel CSH	[31, 32]
1410	Vibraciones Si-O	[33]
2350	Vibraciones C-O en CO_2 limitadas en fase amorfa	[34]
2920	Vibraciones C-O en CO_2 limitadas en fase amorfa	[34]
3645	Vibración de estiramiento O-H de la portlandita	[31, 32]

La Fig. 8 muestra los espectros IR del concreto reciclado pulverizado, activadas alcalinamente a diferentes concentraciones de NaOH. Observándose que todos los espectros son variables, en donde a cierto número de onda se puede apreciar variabilidad.

El principal cambio en los espectros IR de PCR tras la activación alcalina está relacionado con las bandas de vibración de Si-O, entre los 700 cm^{-1} y 1500 cm^{-1} y son las que sufren un ensanchamiento y desplazamiento hacia un número de onda más bajo, esto también lo han observado otros investigadores [35, 36]. El ensanchamiento del pico significa la transición a una estructura menos ordenada, debido a la formación de enlaces Si-Al distribuidos aleatoriamente [35]. La transición de las bandas relacionadas con Si-O cerca de 1410 cm^{-1} a números de onda más bajos se debe a la transición del modo de estiramiento simétrico al asimétrico de los enlaces Si-O, que

sigue a la despolimerización de los silicatos y a la sustitución de parte del Si por Al [26, 35, 37].

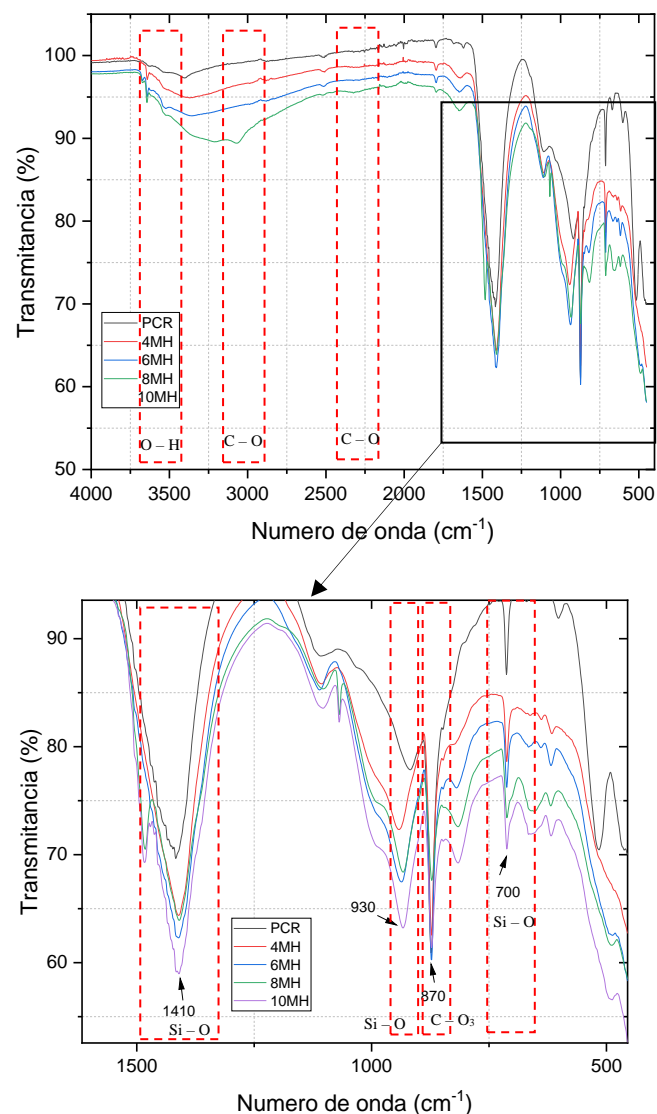


Fig. 8. Espectros IR de PCR y especímenes de Geopolímero preparados con concentraciones de NaOH 4M, 6M, 8M, 10 M y curados 72 horas a 40° C, luego a temperatura ambiente hasta los 7 días.

Algunos investigadores también han informado del desplazamiento de los picos de Si-O hacia números de onda mayores debido a la activación alcalina. Por ejemplo, en [36], informaron del desplazamiento hacia números de onda más altos, superiores a 700 cm^{-1} , para la geopolimerización de escoria, pero el desplazamiento hacia números de onda más bajos para el geopolímero basado en ladrillo rojo/metacaolín. La vibración de estiramiento Si-O de las unidades SiQ^n corresponde a las bandas centradas alrededor de 870, 930 y 1410 cm^{-1} , respectivamente para $n = 0, 1, 2, 3, \text{ y } 4$ [37]. La vibración Si-O del SiQ^3 corresponde a los 1100 cm^{-1} y es el que tiene el segundo grado más alto de polimerización, pero debido

a la activación alcalina, se desplaza hacia un número de onda más bajo y después de la policondensación se desplaza hacia un número de onda más alto. En el presente estudio, tanto las muestras de PCR como los geopolímero elaborados a diferentes concentraciones de NaOH muestran un desplazamiento hacia números de onda más bajos. El mayor desplazamiento en el espécimen preparado con una concentración de NaOH 10M indica un mayor grado de activación alcalina en los sistemas de geopolímeros con calcio, ya que existe un mayor número de NBO_s (sin puentes de oxígenos) en relaciones Na/Al superiores a 1 [26], que es el caso de la muestra preparado con una concentración de NaOH 10 M. Además, aparece un nuevo pico débil y ancho a 1410 cm^{-1} , que se debe a la formación de una nueva fase de aluminosilicato relacionada con la geopolimerización [33]. Esta banda también es más fuerte en el espécimen preparado con una concentración de NaOH 6 M. La disminución de la altura de la banda relacionada con los silicatos tras la geopolimerización se debe a la formación de gel CSH. El otro cambio importante en los espectros IR de los materiales originales está relacionado con la disolución completa de la portlandita en el PCR.

IV. CONCLUSIONES

El incremento de la concentración de NaOH, como activador alcalino, en las pastas de concreto reciclado originó un aumento en la resistencia a la compresión y densidad en las pastas elaboradas con concreto reciclado las cuales fueron activadas con una temperatura de curado a 40° C durante 72 horas y luego con un curado a temperatura ambiente (25°C) hasta completar los 7 días.

Los resultados de resistencia a la compresión para las pastas elaboradas con una concentración 6M fue de 13.66 MPa y conforme se incrementaba la concentración hasta 10M de NaOH se determinó una resistencia a la compresión de 30.10 MPa, lo que representa un incremento de 27 % y 180 % con respecto a la pasta de cemento portland ordinario que arrojó una resistencia a la compresión de 10.749 MPa.

Con respecto a la densidad se evidencio resultados para la pasta con $[\text{NaOH}]$ 6M de 1970 kg/m^3 y para la pasta con $[\text{NaOH}]$ 10 M su densidad fue de 2120 kg/m^3 , lo que representan un incremento del 15 % y 24% con respecto a la pasta de cemento portland ordinario que arrojó una densidad de 1710 kg/m^3 el mismo que fue elaborado mezclando cemento con agua desionizada en igualdad de relación a/c la cual fue de 0.18.

La resistencia a la compresión fue afectada directamente por la concentración de NaOH, este mecanismo se generó debido a que a mayor concentración de NaOH una mayor cantidad de cationes de sodio (Na^+) atacan a la superficie de la fase sólida, lo que lleva a la disolución de más Si y Al y, por lo tanto, a una mayor concentración de Si y Al en la fase sólida y fase líquida dando como resultado una mayor resistencia a la compresión.

La microscopía óptica arrojó que a mayor concentración de NaOH (10 M) se evidencia menores espacios vacíos, ello genera mejores propiedades a la pasta de concreto reciclado como una alta resistencia a la compresión y a menores concentraciones de NaOH (4M, 6M, 8M) se observan mayores porosidades o espacios vacíos generando una baja resistencia a la compresión.

Con respecto al análisis FTIR -ATR, se evidencia que, para todas las muestras ensayadas, en el rango de número de onda desde 700 a 1500 cm^{-1} se observan estiramientos de Si-O provenientes de los tetraedros de SiO_4 . A 870 se observan las vibraciones de $-\text{CO}_3$ convirtiéndose en CaCO_3 . A 930 cm^{-1} se observa la formación de geles de silicato de calcio hidratado (CSH). Superior a 3645 cm^{-1} se aprecia Vibración de estiramiento O-H de la portlandita.

AGRADECIMIENTOS

Laboratorio de Materiales Compuestos. Escuela de Ingeniería de Materiales – Universidad Nacional de Trujillo.

REFERENCIAS

- [1] Sistema Español de Inventario de Emisiones. (21 de enero de 2023). *Fabricación de cemento*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/030311-combust-fabric-cemento_tcm30-430164.pdf
- [2] León-Velez, A., & Guillén-Mena, V. (2020). Embodied energy and CO₂ emissions in the cement manufacturing process in Ecuador. *Ambiente Construido*. doi:<https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>
- [3] MINEM. (04 de marzo de 2016). *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético*. Obtenido de Industrias Cementeras: https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGEE/eficiencia%20energetica/publicaciones/guias/12_%20%20guia%20industrias%20cementeras%20DGEE%2006-09-19.pdf
- [4] Sánchez, J., Domínguez, R., León, M., Samaniego, J., & Sunkel, O. (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad*. Santiago: Naciones Unidas.
- [5] Montero-Matos, J., Restrepo-Baena, J., & Otaño-Nogel, J. (2017). Sustainable closure of construction materials quarries in Cuba. *Minería y Geología*, 4489-463. Obtenido de [http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art6_No4_2_017/pdf\(pdf\)](http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art6_No4_2_017/pdf(pdf))
- [6] Suárez-Silgado, S., Betancourt-Quiroga, C., Molina-Benavides, J., & Mahecha-Vanegas, L. (2019). The management of the construction and demolition waste in Villavicencio: current status, barriers and management. *Entramado*, 224-244. doi:<http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5408>
- [7] Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A., Alonso-Guzmán, E., Chávez-García, H., Hernández-Barríos, H., Lara-Gómez, C., . . . González-Valdéz, F. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT*, 235-248. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000300235&lng=es&tlng=es.
- [8] León, M., & Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Ingeniería de construcción*, 215-240. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000200003>
- [9] Chan, J., Solís, R., & Moreno, É. (2003). Influencia de los agregados ptreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 39-46.
- [10] Quintero, A., Valencia, Y., & Lara, A. (2017). Effect of solid wastes leachates on a tropical soil. *DYNA*, 238-290. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.63875>
- [11] Bonilla, D. (2016). Recycling as a Teaching Strategy for Environmental Conservation. *Scientific*, 36-52. doi:<https://doi.org/10.29394/scientific.issn.2542-2987.2016.1.1.3.36-52>
- [12] Torres, M. (2015). Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. activación, comportamiento y durabilidad. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/670399/torres_carrasc_o_manuel.pdf?sequence=1
- [13] Pardo, N., Penagos, G., Correa, M., & López, M. (2021). Desarrollo de morteros de bajo impacto ambiental a partir de residuos sílico-aluminosos activados alcalinamente del sector minero. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- [14] Salirrosas, J. (2020). Geopolímeros en la industria de la construcción: Aplicaciones con ceniza volante y puzolana natural. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú - Repositorio institucional.
- [15] Husein, G., Rahman, A., Mirza, J., Tahir, M., Mohammad, A., Mohammad, I., & Kwok, W. (2018). Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated Temperatures: Performance evaluation. *Construction and Building Materials*.
- [16] Rivera, J., Cuarán-Cuarán, Z., Vanegas-Bonilla, N., & Mejía, R. (2018). Novel use of waste glass powder: Production of geopolymeric tiles. *Advanced Powder Technology*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.09.023>
- [17] Liu, J., Doh, J.-H. O., Liu, Z., & Hadi, M. (2023). Methods to evaluate and quantify the geopolymerization reactivity of waste-derived aluminosilicate precursor in alkali-activated material: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129784>
- [18] Vidak, M., Terzić, A., Radovanović, Ž., Radojević, Z., & Warr, L. (2022). Alkali-activated geopolymerization of a low illitic raw clay and waste brick mixture. An alternative to traditional ceramics. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129784>
- [19] Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista ingeniería de construcción*, 05-12. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>
- [20] Allahverdi, A., & Khani, E. (2009). Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders. *International Journal of Civil Engineering*, 154-160. Obtenido de <http://ijce.iust.ac.ir/article-1-286-en.html>
- [21] Gonzáles, L., & Diaz, J. (2015). Desarrollo de cementos híbridos activados alcalinamente con desempeño de un cemento de uso general. *Ingeniería de Procesos*. Obtenido de <https://fdocuments.ec/document/desarrollo-de-cementos-hibridos-activados-alcalinamente-.html?page=1>
- [22] Rahhal, V., Bonavetti, V., & Talero, R. (2005). "Hidratación Temprana de Cementos con Mediano y Alto Contenido de Adiciones Minerales Cristalinas. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 13-24. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1276/127619745002.pdf>
- [23] Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y., & Tam, V. (2019). Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 139-151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.211>
- [24] Saloni, P., Yee, Y., & Thong, P. (2021). Effective utilisation of ultrafine slag to improve mechanical and durability properties of recycled aggregates geopolymer concrete. *Cleaner Engineering and Technology*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100330>
- [25] Sata, V., Wongsu, A., & Chindaprasit, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.046>

- [26] Lee, W., & Deventer, J. (2003). Use of Infrared Spectroscopy to Study Geopolymerization of Heterogeneous Amorphous Aluminosilicates. *Langmuir*, 8726-8734. doi:https://doi.org/10.1021/la026127e
- [27] Panias, D., Giannopoulou, L., & Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 246-254
- [28] Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., & Teixeira, A. (2012). Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 167-174. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.049
- [29] Zerbino, R., Giaccio, G., & Marfil, S. (2014). Evaluation of alkali-silica reaction in concretes with natural rice husk ash using optical microscopy. *Construction and Building Materials*, 132-140. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.022
- [30] Yio, M., Mac, M., Wong, H., & Buenfeld, N. (2014). 3D imaging of cement-based materials at submicron resolution by combining laser scanning confocal microscopy. *Microscopy*, 151-169. doi:10.1111/jmi.
- [31] Buchwald, A., Hilbig, H., & Kaps, C. (2007). Alkali-activated metakaolin-slag blends—performance and structure in dependence of their composition. *Journal of Materials Science*, 3024-3032. doi:10.1007/s10853-006-0525-6
- [32] Trezza, M. (2007). Hydration study of ordinary portland cement in the presence of zinc ions. *Mat. Res.*, 10 (4): 331-4. doi:https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000400002
- [33] Guo, X., Shi, H., & Dick, W. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites*, 142-147. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003
- [34] Treadwell, D., Dabbs, D., & Aksay, I. (1996). Mullite (3Al₂O₃-2SiO₂) Synthesis with Aluminosiloxanes. *Chem. Mater.*, 2056-2060. Obtenido de https://www.princeton.edu/~cml/assets/pdf/9608treadwell_mullite.pdf
- [35] Zhang, Y., Sun, W., & Li, Z. (2008). Infrared spectroscopy study of structural nature of geopolymeric products. *Journal of Wuhan University of Technology-materials Science Edition*, 23(4):522-7. doi:10.1007/s11595-007-4522-7.
- [36] Giannopoulou, I., Maragkos, I., & D., P. (2009). Utilization of metallurgical solid by-products for the development of inorganic polymeric construction materials. *Global NEST*, 11(2):127-36. doi:https://doi.org/10.30955/gnj.000589
- [37] Lecomte, I., Henrist, C., Liégeois, M., Maseri, F., Rulmont, A., & Cloots, R. (2006). (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 3789-3797. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2005.12.021.