

Alkaline activation: Cement mortars and recycled brick dust

Cesar Arévalo Aranda, Dr.¹; Segundo Acevedo Zavaleta, Ing.²; Stefany Valdivieso Juárez, Ing.³; Gladys Sandi Licapa-Redolfo, MSc.⁴; Gary Christiam Farfán Chilicaus, MSc.⁵; Danny Chávez Novoa, Msc.⁶, Alexander Vega Anticona, Dr.^{7*}

^{1,5}Departamento de Ingeniería Metalurgia, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, carevalo@unitru.edu.pe;

gfarfanc@unitru.edu.pe

^{2,3,6,7}Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, segundoacevedo20@gmail.com;

stefany.2693@gmail.com; dchavez@unitru.edu.pe

⁵Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, gladys.licapa@upn.edu.pe

*corresponding author: avega@unitru.edu.pe; Av. Juan Pablo s/n, Phone 044 633952

Abstract– In the present research work, the percentage of replacement by weight of recycled brick dust (PLR) in portland cement mortars (CP) was evaluated; replacement percentages were 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%, respectively. The PLR was activated alkaline, for which a solution of NaOH (2M) and sodium silicate (3M) (30/70) v/v was used; the PLR was obtained from the selection and grinding of construction debris from the district of Víctor Larco Herrera (Trujillo-Peru); the PLR that was used in the mixtures was ground and sieved through a N°400 mesh (only the passing powder was used). Once the PLR was obtained, the process of preparing mortar samples for compression tests (ASTM C-109) was carried out, according to the aforementioned replacement percentages. The ratio of aggregate (coarse sand) to binder (CP-PLR) was 3:1; the alkaline solution mixture used was included in the kneading water; the water/cement ratio used was 0.55, these three criteria were kept constant in all cases. After demolding and curing the mortars obtained (PLR and CP), they were cured in an electric oven (70 °C/72 hours) and then allowed to cure at room temperature for 28 days; the total curing time (28 days) was also applied to the PLR-free mortars. The compression tested samples were used to determine the percentage of water adsorption (ASTM C 642). The results of the compression test of the L-20 mortars (CP 80%, PLR 20% and the alkaline solution), produced the highest average compressive strength values (18.69 MPa); this value represents an increase of 59.74%, with respect to the PLR-free cement mortars (11.70 MPa, on average), in the same way the same mortar L-20, obtained an average percentage of water absorption of 8.43%, being 10.92% for the PLR-free cement mortar, which represents a decrease in the percentage of water absorption of 22.80%; The differences in the properties evaluated would be due to the formation of additional gels (CSH and CASH) to the typical process of hydration of the cement mortar, which reduce the voids typical of the cement mixtures and therefore increase the density of the mixture, generating the increase in compressive strength and the decrease in the percentage of water absorption. The results are corroborated through the use of XRD characterization techniques; FTIR -ATR, SEM, plus ANOVA statistical evaluation.

Keywords-- Alkaline activation; Compressive strength, Sodium hydroxide, Sodium silicate.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.268>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos de construcción y demolición se originan como resultado del crecimiento y migración poblacional, estos proceden especialmente de la demolición de viviendas o de la eliminación de materiales propios de las diversas obras en construcción [1]. El aumento de la producción de este tipo de residuos, ha desencadenado el desarrollo de numerosos estudios a fin de evitar que sean depositados en vertederos y fomentar una cultura de reciclaje; Perú no es ajena a la problemática mencionada, así por ejemplo en Lima se generan 19 000 toneladas de desmonte al día (70 % termina en las zonas costeras o en las riberas de los ríos); solo una pequeña proporción va a zonas autorizadas, por lo que la demolición parece ser un negocio tan rentable como la propia construcción, o por lo menos, lo es en Lima, una ciudad donde cada día se producen 30 000 m³ de desmonte, cifras proporcionadas por la Cámara Peruana de la Construcción; en lo referente al sector construcción, según informe de la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO), la actividad de edificación se ha elevado en Trujillo (La Libertad); según el INEI, la provincia de Trujillo cuenta con un total de 177 643 viviendas particulares con ocupantes presentes, en donde el material predominante de las viviendas es ladrillo (58.8 %), mientras que el 38.1 % son de adobe, a nivel distrital, en Trujillo, el material predominante de las viviendas es ladrillo y adobe con 82.6 % y 16.1 % respectivamente, teniendo una similitud con los distrito de Víctor Larco; Florencia de Mora, El Porvenir, La Esperanza [2]; debido a ello, la presente investigación quiere ser un aporte a la posibilidad de reuso de los residuos sólidos de construcción en especial a los residuos de ladrillo de arcilla quemada (ladrillo rojo), mediante el proceso de activación alcalina a una concentración baja a fin de no convertirse en una opcional real para los talleres donde ya se elaboran prefabricados de mezclas de cemento. En lo que respecta al proceso de activación alcalina ya se han venido realizando numerosas investigaciones al respecto con diferentes tipos de residuos, así por ejemplo se han utilizado residuos de minería de carbón y aurífera [3], cenizas [4], polvo cerámico provenientes de baldosas [5], restos de vidrio [6,7] además de residuos sólidos de construcción en especial los residuos del ladrillo de arcilla, así como de los

morteros de cemento y restos de concreto reciclado [5-8], en la mayoría de los casos la solución activadora alcalina es o contiene NaOH, Na₂SiO₃ principalmente [3,6,8,10-15], además de KOH, CaOH [15,16]. Los procesos de activación alcalina incluyen procesos de curado a temperaturas mayores a la temperatura ambiente pero también a esta temperatura [3,4,5,7,8,10,14,15] en muchos de los casos se ha reportado mejoras en las propiedades mecánicas de las mezcla obtenidas a tiempos equivalentes a las mezclas adicionales o a tiempos mayores [3,6,8,10,11,12], sin embargo a pesar de ello, las soluciones alcalinas que contienen NaOH y/o Na₂SiO₃, se elaboran con elevadas concentraciones molares (4-10) M [6], pues esta concentración promueve la mayor formación de geles extra (diferentes a CSH); esto sumado a la elevada superficie de contacto de los residuos finalmente molidos pueden hacer posible las mejoras mencionadas [3,4]. Los geles extra que se pueden generar son denominados CASH y NASH, los cuales se formarían en los espacios dejados por el proceso de curado de la mezcla de cemento [3,6,11,12], geles que se pueden formar por activación alcalina de materiales denominados aluminosilicatos [6]. En esta investigación se ha considerado el reemplazo de polvo de ladrillo de arcilla reciclado activado alcalinamente a bajas concentraciones en morteros de cemento convencionales; sobre su resistencia a la compresión y absorción de agua de morteros, pues se busca una alternativa al alcance de los productores de prefabricados de cemento de la región.

II. SECUENCIA EXPERIMENTAL

A.- Obtención del polvo de ladrillo rojo reciclado (PLR): Las muestras de polvo de ladrillo se obtuvieron de los escombros de construcción de los botaderos informales del distrito de Víctor Larco Herrera de la provincia de Trujillo - Perú, se seleccionó ladrillos de arcilla rojos (maquinados); luego de la selección los ladrillos pasaron por procesos de reducción (chancadora de quijadas - molino de bolas), el polvo de ladrillo rojos (PLR) obtenido fue tamizado, el PLR que se utilizó en las mezclas fue el pasante de malla N°400, de esta forma se logró obtener 20 kg de PLR.

B.- Solución Alcalina: La solución alcalina se obtuvo de la mezcla de NaOH (2M) y Na₂SiO₃ (3M), en una razón de (30/70) v/v.

C.- Obtención de morteros: El cemento utilizado fue de tipo Portland I, de la marca Pacasmayo. El agregado (arena gruesa) utilizado de las canteras de El Milagro (Trujillo-Perú). El agua para el proceso de mezcla y/o amasado se obtuvo de la preparación de la solución alcalina. Las muestras de los morteros obtenidos fueron de forma cubica (ASTM C109), el diseño de las mezclas utilizadas se muestra en la Tabla 1. Los porcentajes de reemplazo de cemento por PLR fueron del (20–100) %, como se muestra en la misma tabla. Para cada nivel de prueba se realizó un total de 10 repeticiones.

TABLA 1. DISEÑO DE MEZCLAS DE MORTEROS DESARROLLADOS.

Código	Agua (g)	Arena gruesa (g)	Conglomerante (g)	
			Cemento	Polvo de ladrillo
PLR- 0	200	1125	375	0
PLR- 20	200	1125	300	75
PLR- 40	200	1125	225	150
PLR- 60	200	1125	150	225
PLR- 80	200	1125	75	300
PLR- 100	200	1125	0	375

D.- Curado de morteros: Pasado 24 h a temperatura ambiente se procedió a desmoldar los morteros obtenidos según se indica en la Tabla 1; luego estos fueron secados en estufa (70°C/72 horas), pasado este tiempo fueron curados a temperatura ambiente hasta completar 28 días.

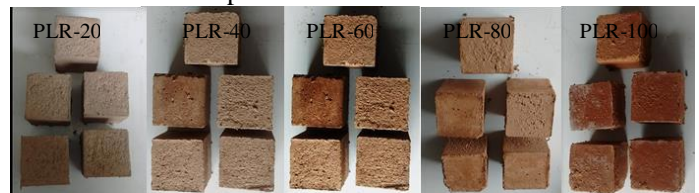


Fig. 1. Morteros de cemento con reemplazo de PLR.

E.- Ensayo de compresión y absorción: El ensayo de compresión se realizó según la norma ASTM C109 de forma aleatoria a temperatura ambiente y una velocidad de carga de 1KN/s. Todas las muestras fueron pesadas y capeadas (azufre) antes del ensayo. El ensayo de absorción se realizó según la norma NTP 339.187. De forma complementaria los morteros fueron evaluados mediante norma ASTM C20 (porosidad y densidad aparente).

F.- Caracterización de morteros:

f.1 Caracterización FTIR-ATR. El PLR fue pulverizado y homogenizado, se utilizaron 10 mg por proceso de caracterización; el equipo utilizado fue de la marca Perkin Elmer modelo Spectrum TWO, en un rango de (450 a 4000) cm⁻¹, la resolución utilizada fue de 4 cm⁻¹ y 32 acumulaciones por número de onda.

f.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM): Se realizó el metalizado la muestra utilizando cobre; el equipo utilizado en este caso es un microscopio de la marca Hitachi modelo Sub230, con una potencia de 3kV a aumentos variables.

f.3 Análisis de difracción de rayos X (DRX): Se utilizaron muestras de 20 mg; se utilizó un difractómetro de rayos X marca Berker modelo D8 Advance; con ángulo de barrido de 10° - 90°

III. RESULTADOS Y DISCUSION

A.-Caracterización del polvo de ladrillo reciclado (PLR).

a.1 Microscopia electrónica de barrido. La morfología de PLR se evaluó mediante microscopia SEM (Fig.2[a,b]), de esta se aprecia una estructura irregular o amorfa de la misma, esta característica se origina por el paso de temperaturas de entre (600 – 900) °C, debido a la pérdida de agua que se encuentra

combinada en los minerales arcillosos, es esta pérdida lo que provoca la descomposición de la red cristalina de la arcilla; esta estructura amorfa favorece el grado de actividad puzolánica [17].

a.2 Difracción de rayos X (DRX): Se identificó que el PLR es rico en cuarzo (SiO_2) y Hematita (Fe_2O_3), además contiene una mezcla de feldespatos como la albita ($\text{Si}_3\text{O}_8\text{Na}_{0.8}\text{K}_{0.2}\text{Al}$) y microclina ($\text{KA}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), como se muestra en la Fig. 3.

B.- Caracterización de morteros

b.1 Difracción de rayos X (DRX): La Fig. 4 muestra los espectros DRX para los morteros de cemento con reemplazo de PLR, en este caso de 20% (L-20), 40% (L-40), 60% (L-60) y 100% (L-100) respectivamente, activados alcalinamente y curados por 28 días.

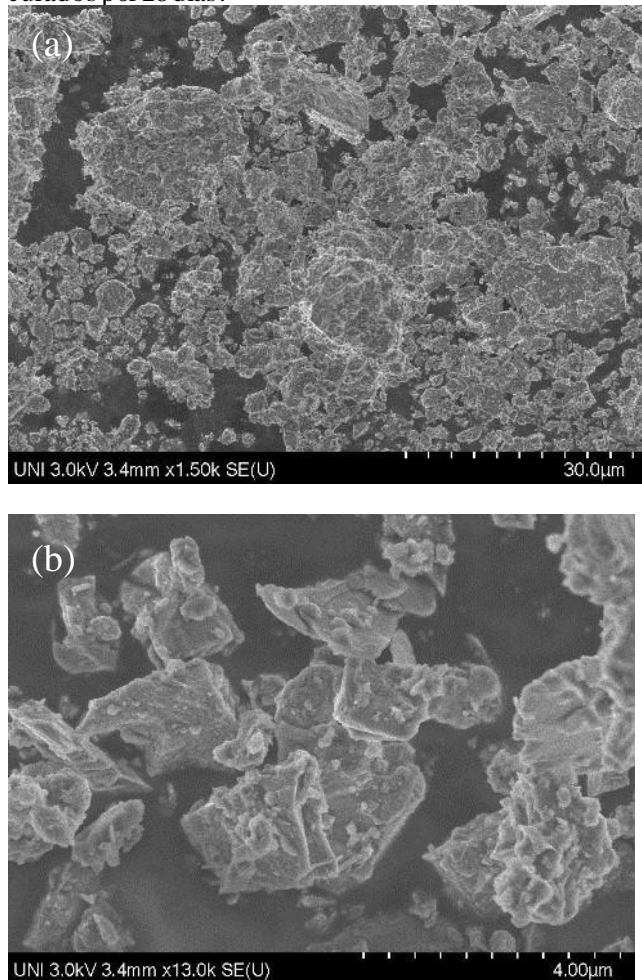


Fig. 2. Micrografía SEM de PLR (a,b)

En la Fig. 4, se pudo identificar el pico de difracción para el hidróxido de calcio (C-H; $\text{Ca}(\text{OH})_2$) para los ángulos de difracción 2θ de 28.02° , 33.77° , 47.57° , para los morteros L-20, L-40 y L-60 respectivamente, estos picos concuerdan con la investigación realizada por [18]. Además, se puede notar que estos picos característicos pertenecientes al hidróxido de calcio (C-H) en los morteros con reemplazos mayores al 40% de PLR,

mostraron una tendencia de disminuir su intensidad, debido a que el (C-H) producido por la hidratación del cemento es consumida también por la reacción puzolánica del PLR y así mismo hay una menor cantidad de cemento disponible para que se generen estos compuestos; además se identificó los picos característicos de la sílice (SiO_2), ubicados en 20.83° , 26.67° , 36.56° y 50.18° para los morteros L-20, L-40, L-60 y L-100, respectivamente, en los patrones de DRX; la intensidad para cada uno de estos picos empieza a incrementarse a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo por PLR, además para los morteros L-20 y L-40, las intensidades de los picos de difracción con respecto a los otros morteros son menores, esto se debe a la reacción puzolánica del PLR, el activador alcalino y los (C-H), producto de la hidratación del cemento portland, que generan la disolución de las fases ricas en aluminosilicatos del PLR para la formación de los geles C-S-H adicional, C-A-S-H y posiblemente C-N-A-S-H [13].

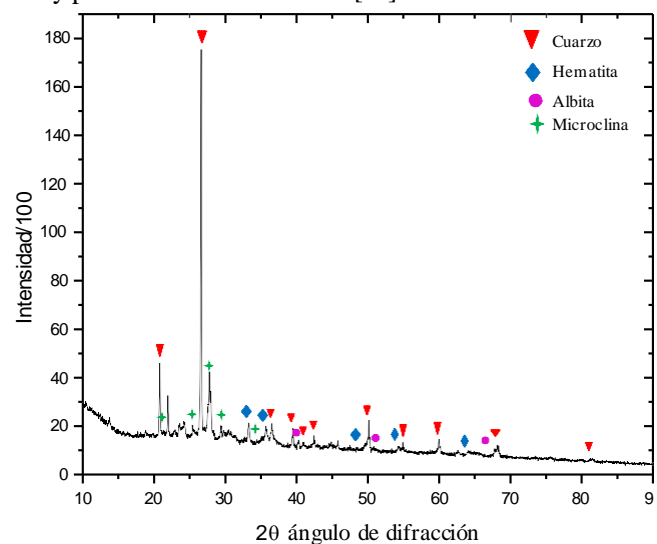


Fig.3. DRX de PLR

Finalmente, el patrón de difracción para el mortero L-100 muestran fases ricas en SiO_2 , debido a que la concentración del activador alcalino no fue lo suficiente para que se promueva la reacción puzolánica mayor del PLR, por lo tanto, la formación de los geles es de forma parcial y por lo tanto su capacidad conglomerante no fue la necesaria para incrementar el grado de compactación de los mismos; esto se verificó en los valores de resistencia a la compresión obtenidos. Además de lo mencionado, se identificó un producto de reacción el gel C-A-H (donde $\text{C}=\text{Ca}$; $\text{A}=\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{H}=\text{H}_2\text{O}$), producto de la reacción puzolánica del cemento portland y PLR, este pico característico se ubicó a 8.77° , 8.83° , 8.75° , para los morteros L-20, L-40 y L-60 respectivamente. La investigación de [18] también encontraron el gel C-A-H en la matriz de mortero de cemento con polvo de ladrillo reciclado a reemplazo de 10% y 20% en peso respectivamente, mediante DRX; en la misma figura se observa que este pico característico disminuye progresivamente, a medida que se incrementa el reemplazo del

cemento portland por PLR, esto dio como resultado la disminución de los productos de hidratación, para la formación de los geles C-A-H evidenciándose en la disminución de la intensidad de estos picos. Finalmente, para los morteros L-20, L-40 y L-60 se pudo identificar los picos ubicados a 29.41° y 48.59° respectivamente, que representa al gel C-S-H (donde C=Ca, S=SiO₂, H=H₂O), producto de la hidratación del cemento y también por la reacción puzolánica del PLR. Los autores [19] identificaron estos picos correspondientes a estos geles de hidrato de silicato cálcico para los cementos mezclados con materiales ricos en aluminosilicatos; se observa que hay una disminución progresiva a medida que se incrementó el reemplazo de cemento portland. Investigadores [20] informan que la generación de las fases C-S-H en combinación con materiales ricos en aluminosilicatos, en conjunto con el activador alcalino se pueden formar geles adicionales tipo C-A-S-H y C-S-H en ciertas condiciones. Las formaciones de estos geles adicionales forman una estructura densa en el curado final de los morteros.

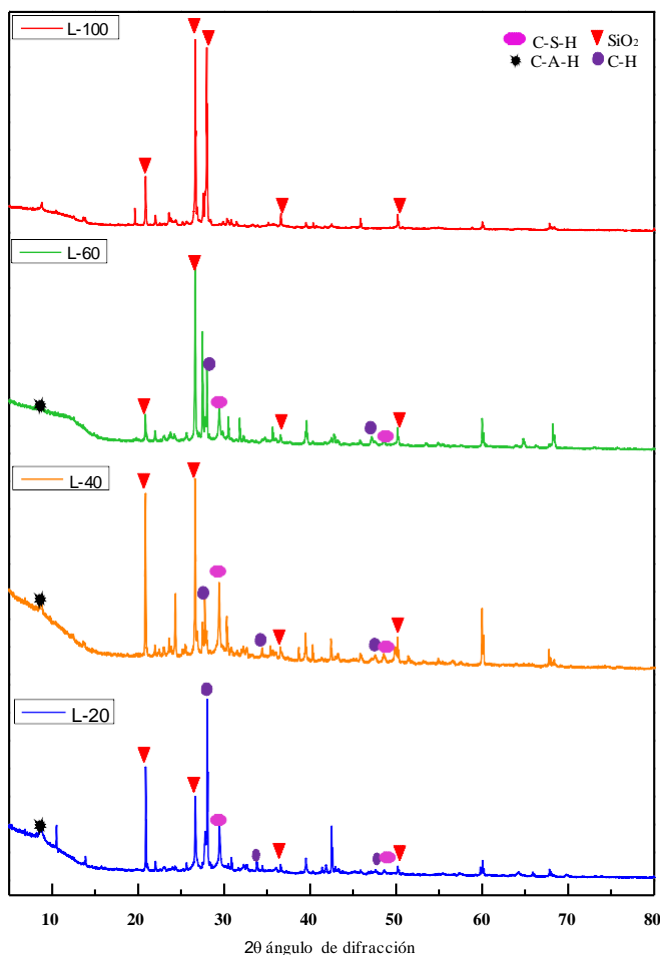


Fig. 4. DRX para morteros de cemento con reemplazos de PLR

b.2 Evaluación FTIR-ATR: En la Fig. 5, se muestra los espectros FTIR-ATR para el reemplazo progresivo de PLR

activado alcalinamente en un mortero de cemento convencional y curados a 28 días. Los picos de absorción, para cada banda rica en aluminosilicatos fueron comparados con los datos reportados en [20-21]. De la comparación podemos mencionar que, para el PLR, se identifican los números de onda 1040.39 cm^{-1} y 1004.96 cm^{-1} , estos se atribuyen a la vibración de los enlaces de los tetraedros de SiO₄ (Si-O) y AlO₃ (Al-O) del PLR rico en aluminosilicatos, los cuales serían desplazados hacia números de onda de entre 956.24 cm^{-1} y 978 cm^{-1} , lo que sugiere la disolución de algunas de estas fases abundantes en aluminosilicatos que contiene el PLR. Para los casos de L-20 y L-40 se observa que esta banda se desplazó hacia números de onda ubicados entre 956 cm^{-1} y 978 cm^{-1} , correspondientes a los estiramientos de los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al que sugiere la formación de nuevos geles adicionales, producto de la alta reacción puzolánica del PLR añadido en los morteros. Según [13], la formación de estos geles, producto de la hidratación del cemento portland y de la reacción puzolánica de las fases abundantes en aluminosilicatos del polvo de ladrillo, ayudan a la formación de una estructura de mayor densidad que favorece el incremento de la resistencia a la compresión. La formación de geles adicionales formados en su mayoría por C-S-H y C-A-S-H, que se generaron por la acción combinada del hidróxido de calcio, producto de la hidratación del cemento, sumado a la solución activadora que le fue añadida en el diseño de mezcla de los morteros con reemplazos progresivos; en [13] describe que en los denominados cementos híbridos, se ha demostrado la posibilidad de coprecipitación y/o interacción de los dos geles N-A-S-H y C-S-H, en cualquiera de los casos esto genera cambios microestructurales y de composición en las mezclas; la estabilidad de la estructura N-A-S-H en presencia de calcio depende del pH; a baja alcalinidad, el sodio es reemplazado parcialmente por calcio para formar un gel (N, C) -A-S-H; por el contrario, en presencia de suficiente calcio y alta alcalinidad (pH superior a 12), se favorece la formación de C-A-S-H; por lo que la formación de geles C-S-H y C-A-S-H son los productos de PLR activado alcalinamente en los morteros L-20 y L-40, además el elevado contenido de fases ricas en SiO₂ y Al₂O₃, sumado la naturaleza amorfa de polvo de ladrillo reciclado, conduce a la formación progresiva de geles extra en su mayoría C-S-H y C-A-S-H que posteriormente reduce la porosidad, una condición vital para la formación de una morfología de mayor densidad. Para el PLR sin activación alcalina (PLR de la Fig. 5), se identificó los siguientes números de onda 796.81 cm^{-1} y 776.44 cm^{-1} correspondientes a la vibración de los enlaces Si-O y a 689.63 cm^{-1} correspondiente al estiramiento de la banda Si-O-Si lo que sugiere compuestos ricos en cuarzo (SiO₂), como se observó en el patrón de DRX (Fig. 3); para el caso de L-100, se puede observar que número de onda de 996 cm^{-1} , tiene un desplazamiento si es comparado con los otros morteros en iguales números de onda; lo que puede ser una evidencia de que la activación alcalina de las fases ricas en aluminosilicato del PLR han ocurrido parcialmente, debido a que las cadenas de los tetraedros de SiO₄ y AlO₄ no han formado nuevos geles, correspondiente al gel N-

A-S-H o C-S-H, esto fue explicado en líneas anteriores, dado que el PLR, es un material pobre en calcio y se ha usado el activador alcalino a baja concentración. Asimismo de la Fig. 5, se identificó los números de onda de entre 796 cm^{-1} y 519 cm^{-1} que corresponden a los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al, de los tetraedros de las fases ricas en aluminosilicatos del PLR, se puede observar que los números de onda para los morteros L-20 y L-40, disminuyen en % de transmitancia en comparación a la del polvo de ladrillo sin activación alcalina (PLR en la Fig. 5); lo que indica que ha ocurrido la formación de los geles mencionados anteriormente; pero para los morteros L-60 y L-100, la variación señalada es mucho menor, lo cual nuevamente sería indicio de la baja concentración de la solución alcalina utilizada, pues sería insuficiente para los porcentajes de PLR presentes en las mezclas y por ende no se logra mayores formaciones de geles.

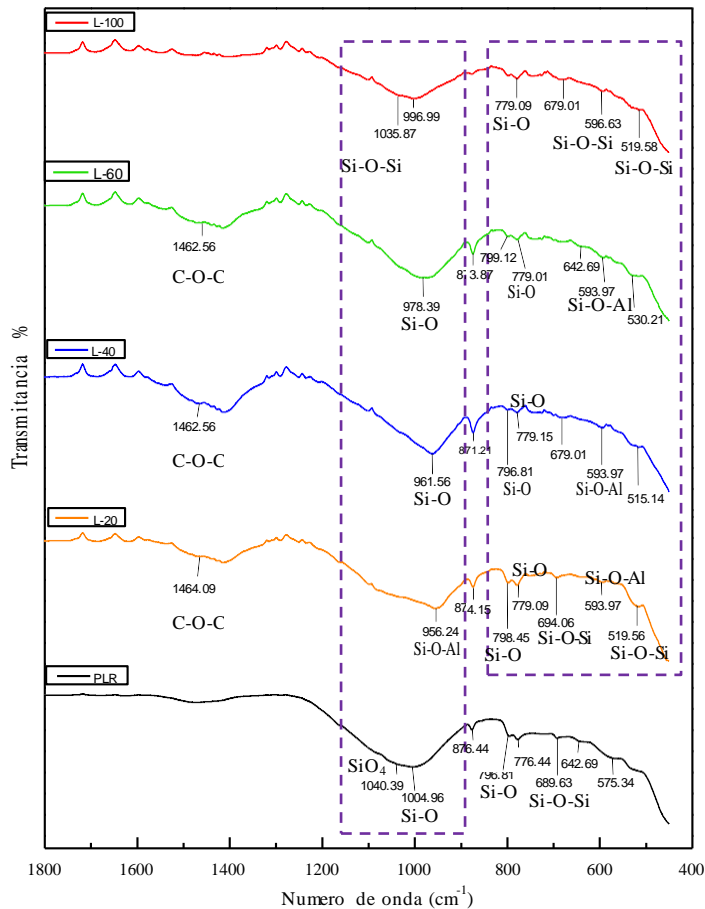


Fig. 5. Espectro FTIR-ATR, para morteros de cemento y PLR (L-20 (20%); L-40 (40%); L-60 (60%); L-100(100%)), tiempo de curado: 28 días.

b.3 Microscopia SEM: La Fig. 6 muestra las imágenes obtenidas por SEM, para los morteros de cemento con diferentes porcentajes de reemplazo de PLR donde a, b, c y d pertenece a L-20, L-40, L-60 y L-100 respectivamente. Se observa que para el mortero L-20 muestra una estructura compacta y reducida en vacíos en comparación a los morteros

L-40, L-60, L-100. Para el mortero L-40 se aprecia microgrietas (flecha azul), esta se pudo haber formado durante el proceso de liberación de calor durante el curado de los morteros, así mismo en comparación del mortero L-20, los tamaño y cantidad de vacíos (círculo amarillo) se presentan en mayor cantidad. Finalmente, para los morteros L-60 y L-100 se evidencia una falta de conglomeración entre agregados y cemento - PLR, esto debido a que el porcentaje de PLR contenido en el mortero era mayor que el del propio cemento, por ello no se habría producido el proceso de activación alcalina en la mayoría del material añadido, obteniendo una estructura porosa e irregular y por lo tanto propiedades mecánicas muy por debajo de los valores obtenidos en el mortero de cemento convencional, lo mencionado concuerda con [18] quienes mencionan que una baja concentración de activador alcalino, tiene poca capacidad para romper los enlaces covalentes Si-O-Si y Al-O-Si de los materiales ricos en aluminosilicatos del PLR.

b.4 Resistencia a la compresión: La Fig. 7 muestra los valores de la resistencia a la compresión de los morteros obtenidos; los máximos valores promedio obtenidos fueron de 18.69 MPa y 12.43 MPa para los morteros L-20 y L-40 respectivamente, representando un incremento de 59.74% y 6.24% respecto al mortero de cemento convencional, respectivamente, este incremento se debería a la formación de nuevos geles en su mayoría por C-A-S-H / (C,N)-A-S-H, producto de la activación alcalina de los aluminosilicatos del PLR [13], hecho que fue evaluado y descrito en la sección de evaluación FTIR- ATR y DRX, donde se ha verificado el consumo de las fases ricas en sílice y alúmina, ello debido a la formación de geles adicionales; estos disminuyeron los vacíos del mortero en los casos aquí mencionados, generando el incremento de la resistencia a la compresión. Para los casos de los morteros L-60, L-80 y L-100 se determinaron los valores de resistencia a la compresión promedio de 4.27 MPa, 3.57 MPa, 2.50 MPa, respectivamente, estos valores representan una disminución de 63.50%, 69.46 y 78.63% respecto al mortero de cemento convencional, ello debido a que la concentración del activador alcalino no fue suficiente para activar la totalidad de las fases ricas en aluminosilicatos del PLR [13].

b.5 Absorción de agua: La Fig. 8 muestra la variación de los porcentajes de absorción de agua en los morteros desarrollados; en este caso para los morteros de código L-20 y L-40, los porcentajes de absorción fueron de 8.43% y 8.96% respectivamente, mientras que para el mortero convencional fue de 10.92%, la disminución de los valores mencionados, es evidencia de la menor presencia de vacíos, en los casos mencionados, ello debido a la formación de los nuevos geles mencionados en párrafos anteriores. Para los morteros L-60, L-80 y L-100 los porcentajes fueron de 11.47%, 11.75%, 12.75% respectivamente, en estos casos superiores al mortero convencional, este aumento de la capacidad de absorción de agua se debe a la falta de capacidad conglomerante que el PLR no alcanza debido a la baja concentración de la solución

alcalina utilizada y elevado porcentaje de partículas de PLR. La Fig. 9 muestra el efecto del incremento del porcentaje de reemplazo de PLR sobre los valores promedio de resistencia a la compresión, porosidad, densidad y porcentaje absorción de agua.

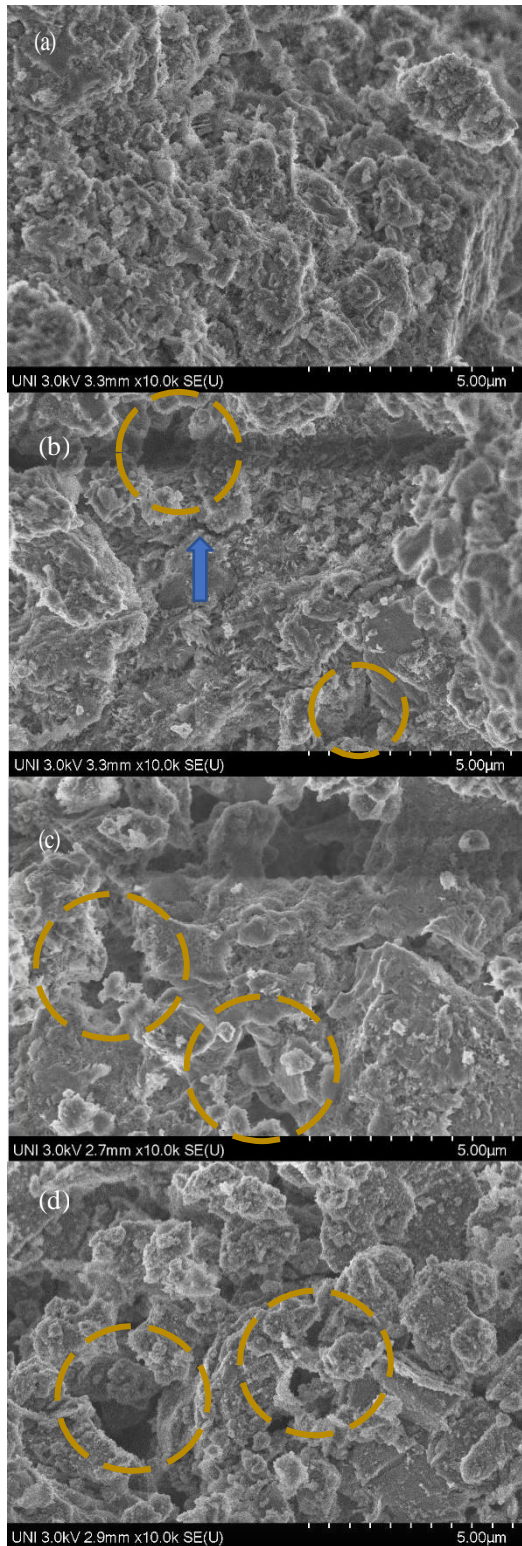


Fig. 6. Microscopia SEM de los morteros modificados (a) L-20, (b) L-40, (c) L-60, (d) L-100

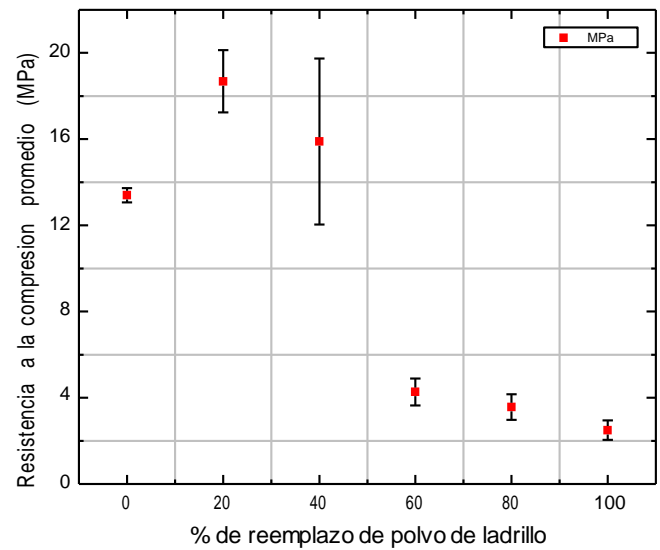


Fig. 7. Resistencia a la compresión de morteros, con reemplazos de PLR

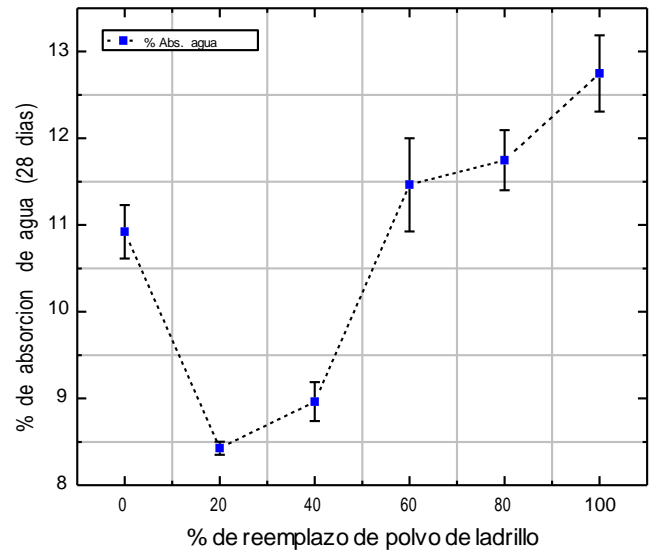


Fig. 8. % de absorción de agua de morteros, con reemplazos de PLR

En la Fig. 9 se evidencia que los morteros con códigos L-20 y L-40 presentaron los mayores valores de resistencia a la compresión, disminución de su porosidad y de su porcentaje de absorción de agua y un aumento en su densidad, ello comparando con los mismos valores que el mortero de cemento convencional, esta tendencia corrobora la hipótesis de la generación de nuevos geles ya descrita, de la misma figura para los casos de los morteros con códigos L-60 y L-80, la resistencia a la compresión disminuye, en comparación al

mortero de cemento convencional, esto debido a la falta de capacidad aglomerante de las partículas de PLR como también se ha mencionado en párrafos anteriores.

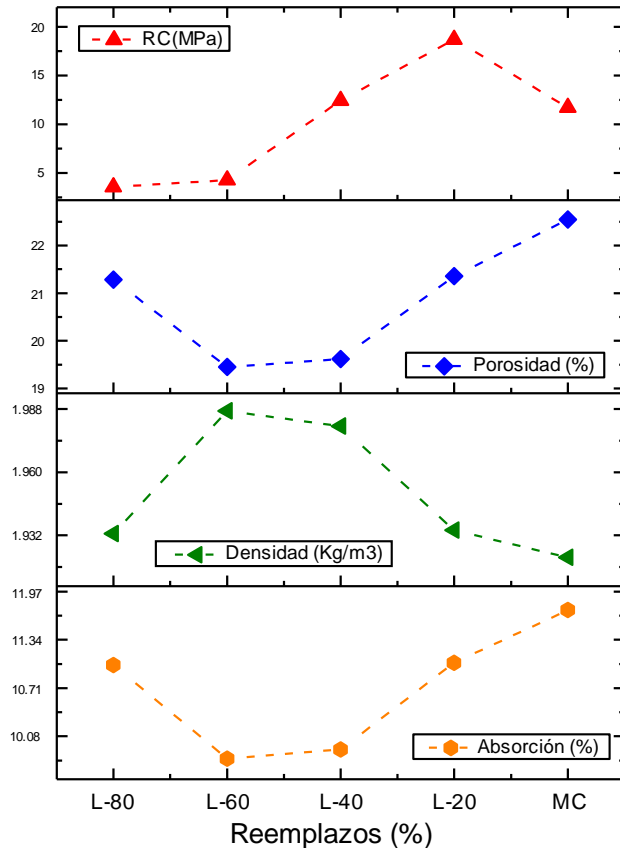


Fig. 9. Valores promedio de resistencia a la compresión, densidad, porosidad y absorción de los morteros desarrollados. (MC= mortero convencional).

IV. CONCLUSIONES

El reemplazo progresivo de cemento por polvo de ladrillo reciclado (PLR) en morteros de cemento generó el incremento de la resistencia a la compresión y disminución del porcentaje de absorción de agua, para los morteros con porcentajes de reemplazo del 20 % (L-20) y del 40% (L-40), cuando estos fueron activados alcalinamente, curados a 70 °C/72 h. y posterior curado a temperatura ambiente hasta completar 28 días; los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los morteros L-20 y L-40 fueron de 18.69 MPa y 12.43 MPa respectivamente, los cuales representan un incremento del 59.74% y 6.24% respectivamente, respecto al mortero de cemento convencional desarrollado (sin reemplazos, sin adición de solución alcalina), de valor promedio de resistencia de 11.7 MPa. En los morteros L-20 y L-40 se obtuvo un porcentaje de absorción de agua de 8.43% y 8.96%, estos valores son menores respecto al mortero de cemento convencional, que presentó un

porcentaje de absorción promedio de 10.92%. Para los casos de L-60, L-80 y L-100 los valores de resistencia a la compresión son menores a las del mortero de cemento convencional, para estos mismos los valores de absorción de agua fueron mayores, esto se debería a que en estos morteros la presencia de PLR fue elevada y la concentración de la solución alcalina fue baja, dificultando el proceso de activación alcalina y restringiendo la formación de geles.

Los resultados de la caracterización DRX del PLR, señalan que está constituido en su mayoría por compuestos ricos en SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

Los resultados de la caracterización DRX de los morteros con códigos L-20 y L-40 mostraron consumo de las fases ricas en aluminosilicatos del PLR, además del incremento de la formación de los geles CSH, CASH, sin embargo, para los morteros de código L-60 y L-100, se pudo identificar la fuerte presencia de fases ricas en SiO_2 .

De los resultados de FTIR-ATR, de los morteros con códigos L-20 y L-40, se observó que para las mismas enlaces de moléculas (Si-O, Al-O), existió variación de los números de onda, de estos se dedujo la formación de los denominados nuevos geles, mayoritariamente formados por CSH, CASH y (C,N)ASH; sin embargo, en los morteros L-60 hasta L-100 la disposición de los números de onda se asemeja al PLR.

La microscopia SEM de los morteros con códigos L-20 y L-40, indica menor cantidad de vacíos y por ende mayor grado de compactación; mientras que para los morteros L-60, L-80 y L-100 se evidencia mayor cantidad de vacíos en comparación a L-20 y L-40.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] Arenas, F. (25 de octubre de 2021). Los materiales de construcción y el medio ambiente. https://huespedes.cica.es/gimadus/17/03_materiales.html
- [2] El Comercio. (14 de agosto de 2020). Lima y la generación de desmonte. Obtenido de <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/lima-generan-19-mil-toneladas-desmonte-dia-70-mar-rios-noticia-453274>.
- [3] Pardo, Nicolas & Penagos, Guillermo & Correa, Mauricio & López, María. (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. 10.1016/j.bsecv.2021.09.003.
- [4] Salirrosas, J. (2020). Geopolímeros en la industria de la construcción: Aplicaciones con ceniza volante y puzolana natural. Pontificia Universidad Católica del Perú. Repositorio institucional Pontificia Universidad Católica del Perú.

- [5] 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*, 11. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.226.
- [6] Rivera, J., Cuarán-Cuarán, Z., Vanegas-Bonilla, N., & Mejía, R. (2018). Novel use of waste glass powder: Production of geopolymeric tiles. *Advanced Powder Technology*, 7. doi:https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.023.
- [7] Lu, J., & Poon, C. (2018). Use of waste glass in alkali activated cement mortar. *Construction and Building Materials*, 9. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.080.
- [8] Cristelo, N., Fernández-Jiménez, A., Vieira, C., Miranda, t., & Palomo, Á. (2018). Stabilisation of construction and demolition waste with a high fines content using alkali activated fly ash. *Construction and Building Materials*, 14. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.057.
- [9] Lopes, V., Rocha, G., & Pinto, L. (2018). Performance of self-compacting concretes with wastes from heavy ceramic industry against corrosion by chlorides. *Construction and Building Materials*, 11. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.034.
- [10] Sedira, N., Castro-Gomez, J., & Magrinho, M. (2018). Red clay brick and tungsten mining waste-based alkali-activated binder: Microstructural and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 15. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.153.
- [11] Rovnaník, P., Rovnaníková, P., Vyšvaril, M., Grzeszczyk, S., & Janowska-Renkas, E. (2018). Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 10. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.150.
- [12] Robayo-Salazar, R., Mejía-Arcila, J., & Mejía, R. (2017). Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. *Construction and Building Materials*, 32. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.243.
- [13] Robayo, R. A., Mulford, A., Munera, J., & Mejía de Gutiérrez, R. (2016). Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*(128), 163-169.
- [14] Reig, L., Soriano, L., Borrachero, M., Monzo, J., & Paya, J. (2016). Influence of calcium aluminate cement (CAC) on alkaline activation of red clay brick waste (RCBW). *Cement and Concrete Composites*, 9. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.021.
- [15] Komnitsas, K. (2016). Co-valorization of marine sediments and construction & demolition wastes through alkali activation. *Environmental Chemical Engineering*, 9. doi:https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.003.
- [16] Prasanphan, S., Wannagon, A., Kobayashi, T., & Jiemsirilers, S. (2019). Reaction mechanisms of calcined kaolin processing waste-based geopolymers in the presence of low alkali activator solution. *Construction and Building Materials*(221), 409–420.
- [17] Reig, L., Tashima, M., Borrachero, V., Monzó, J., Cheeseman, R., & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 1(43), 98-106.
- [18] Shao, J., Gao, J., Zhao, Y., & Chen, X. (2019). Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. *Construction and Building Materials*(213), 209–215.
- [19] Hwang, C.-L., Yehualaw, M. D., Vo, D.-H., & Huynh, T.-P. (2018). Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders. *Construction and Building Materials*(218), 519–529.
- [20] Ortoboy, Sinem & Li, Jiaqi & Geng, Guoqing & Myers, Rupert & Monteiro, P. & Maboudian, Roya & Carraro, C.. (2017). Effects of CO₂ and temperature on the structure and chemistry of C-(A-)S-H investigated by Raman spectroscopy. *RSC Adv.* 7. 48925-48933. 10.1039/C7RA07266J.
- [21] Rifai, Yasser & Yahia, Ammar & Mostafa, Ahmed & Aggoun, Salima & Kadri, El-Hadj. (2019). Rheology of fly ash-based geopolymer: Effect of NaOH concentration. *Construction and Building Materials*. 223. 583-594. 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.028.