ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1639

Compressive strength and change in length of concrete by replacing fine aggregate with recycled glass exposed to sulfates

Oscar Bocanegra Amoroto, Bachiller[1], Omar Orbegozo Pinedo, Bachiller[1],
Marco Antonio Junior Cerna Vásquez, Maestro[1]

[1]Universidad César Vallejo (UCV), Perú. bbocanegraam@ucvvirtual.edu.pe, oorbegozo@ucvvirtual.edu.pe, mcernav@ucvvirtual.edu.pe

Abstract* – *This research was conducted in the city of Trujillo to evaluate the influence of partial replacement of fine aggregate with recycled glass on the mechanical properties of concrete with a design strength of f'c = 280 kg/cm². Using a quantitative approach and a quasi-experimental design, 120 cylindrical specimens (100x200 mm) were tested for compressive strength at 7, 14, 28 and 56 days, five core samples were drilled to assess the compressive strength of slabs at 28 days, and 60 prismatic specimens (75x75x285 mm) were evaluated for length change at 7, 14, 28 and 56 days. The greatest increase in compressive strength was observed in the C10V treatment, achieving improvements of 8.35% and 14.21% at 28 days under standard curing and sulfate-modified curing (S1), respectively, meeting ASTM C39 and ACI 318-19 standards. Additionally, the C10V treatment reduced length change by up to 35% at 28 days. However, under sulfate-modified curing (S1), the C20V concrete and the control concrete exhibited better performance. All treatments remained within the limits recommended by ACI 201.2R-01, staying below 0.02% up to 14 days and 0.20% at 28 days as recommended by ASTM C126, indicating that expansion does not compromise concrete durability. In conclusion, the partial replacement of fine aggregate with recycled glass is viable, as it enhances compressive strength and reduces length change, contributing to longer concrete durability while improving some of its mechanical properties.

Keywords* — *Compressive strength, length change, concrete, glitter, concrete slab, ground recycled glass.

Resistencia a la compresión y cambio de longitud del concreto sustituyendo el agregado fino por vidrio reciclado expuesto a sulfatos

Oscar Bocanegra Amoroto, Bachiller[1], Omar Orbegozo Pinedo, Bachiller[1],
Marco Antonio Junior Cerna Vásquez, Maestro[1]

[1]Universidad César Vallejo (UCV), Perú. bbocanegraam@ucvvirtual.edu.pe, oorbegozo@ucvvirtual.edu.pe, mcernav@ucvvirtual.edu.pe

Resumen – La presente investigación se realizó en la ciudad de Trujillo para evalúa la influencia del reemplazo parcial del agregado fino por vidrio reciclado en las propiedades mecánicas del concreto f'c=280 Kg/cm². Mediante un enfoque cuantitativo y un diseño cuasi experimental se trabajó con120 probetas cilíndricas (100x200mm) para evaluar la resistencia a la compresión a los 7, 14, 28 y 56 días, 5 núcleos perforados para evaluar la resistencia a la compresión de las losas a los 28 días y 60 probetas prismáticas (75x75x285mm) para el cambio de longitud a los 7, 14, 28 y 56 días. El mayor incremento de la resistencia a la compresión se observó con el tratamiento C10V alcanzando mejoras del 8.35 y 14.21% a los 28 días en curado estándar y curado moderado en sulfatos S1, respectivamente, cumpliendo con las normativas ASTM C39 y ACI 318-19. Asimismo, el tratamiento C10V redujo hasta un 35% el cambio de longitud a los 28 días, sin embargo, en el curado moderado por sulfato S1 quien tuvo mejor comportamiento fue el concreto C20V y el concreto patrón, todos los tratamientos se mantuvieron dentro de los límites recomendado por ACI 201.2R-01 debajo 0.02% hasta los 14 días y 0.20% a los 28 días recomendando por la ASTM C126 lo que indica que la expansión no afectara la durabilidad del concreto. En conclusión, la sustitución parcial del agregado fino por vidrio reciclado es viable debido a que mejora la resistencia a la compresión y reducir el cambio de longitud contribuyendo a incrementar la vida útil del concreto mejorando alguna de sus propiedades mecánicas.

Palabras clave – Resistencia a la compresión, cambio de longitud, concreto, diamantina, losa de concreto, vidrio reciclado molido.

I. INTRODUCCIÓN

Para el año 2023, el 56% de la población mundial vivía en ciudades y se estima que esta cifra podría duplicarse para el 2050, lo que implicaría que 7 de cada 10 personas viviendo en áreas urbanas construidas en gran parte con concreto [1]; en el Perú el año 2024 el sector construcción mostró un crecimiento del 6.60 % durante el primer trimestre de 2024 y se está incrementando debido a las obras de inversión pública, en su mayoría destinadas a la prevención de riesgos. No obstante, este crecimiento del sector todavía no se ha consolidado completamente [2]. De igual manera, el cemento consumido incremento en un 7.46% [3] lo que se refleja en un incremento de construcción con concreto. Sin embargo, este crecimiento del consumo se ve opacado debido a que el 80% del concreto usado para la construcción de viviendas se da en un contexto de autoconstrucción [4]; parte de las construcciones formales, en específico las de preventa por inmobiliarias no están considerando condiciones sismorresistentes, aunque son más seguras que las de autoconstrucción [5], siguen teniendo una gran vulnerabilidad a estos fenómenos sobre todo porque la Costa Peruana está dentro "Cinturón de fuego del Pacifico" con el 90% de actividad sísmica del planeta ocasionando mayor incidencia de fallas estructurales mediante aparición de grietas, fisuras y hasta colapsos de este tipo de construcciones lo que incrementa las pérdidas de vidas humanas por las malas prácticas. Bajo este panorama es importante investigaciones de materiales que ayuden a mejorar la calidad del concreto producido en la autoconstrucción.

Actualmente el uso de materiales altamente disponibles como el vidrio, que tarda en degradarse unos 4,000 años [6], en la producción de concreto de mejor calidad es viable debido a su gran disponibilidad y alta composición de SiO2 (sílice) que lo hace muy similar a la arena de construcción, además la facilidad para reducir su tamaño lo hace muy atractivo y potencial como sustituto en parte del agregado tradicional. La mayoría de los residuos de vidrio vienen en colores variados, siendo las propiedades químicas y físicas similares independientemente del color, que pueden variar debido a las diferentes composiciones de concentraciones menores de óxidos de metales de transición [7].

El vidrio al ser incorporado como agregado fino en el concreto puede influir en varias propiedades del concreto dependiendo del tipo de vidrio y del tamaño de las partículas de vidrio utilizado [8], al igual que al usar vidrio reciclado, logro producir una acción puzolanica que evita la reacción álcali-silica (ASR) y por lo tanto reduce el fisuramiento del concreto a temprana edad [9] que se puede dar con el uso del agregado tradicional que es un problema común en el concreto que puede comprometer su integridad estructural [10].

Al usar vidrios reciclados de distinta composición encontrando que la reacción álcali-silica (ASR) mantuvo el cambio de longitud por debajo del valor critico 0.1% reduciendo el fisuramiento del concreto [11].

Tomando las referencias previas, se evaluó la influencia de utilizar vidrio reciclado para reemplazar parte del agregado fino

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

(arena) en la elaboración de concreto en la ciudad de Trujillo. Desde la perspectiva técnica de ingeniería realizaron el análisis y pruebas de laboratorio para determinar su efectividad estructural. El objetivo de la presente investigación es determinar la influencia del reemplazo del agregado fino por parte de vidrio reciclado en las propiedades físicas y mecánicas del concreto f'c = 280 Kg/cm2 en la ciudad de Trujillo contribuyendo con el objetivo de desarrollo sostenible "Ciudades y comunicaciones sostenibles" (OSD 11), mediante el diseño de concreto alternativo reduciendo la cantidad de arena explotada en canteras, contaminación del maquinaria y transformación del entorno, y la reducción de la cantidad de vidrio desechado que es de muy larga degradación.

II. MATERIALES Y METODOS

A. Agregados

Los materiales pétreos, tanto agregado fino como grueso, fueron extraídos de la cantera El Milagro, ubicada en la región de La Libertad, provincia de Trujillo. Esta cantera se encuentra a 4 km del Óvalo Huanchaco, en la carretera principal de la Panamericana Norte.

B. Vidrio reciclado

El vidrio reciclado de una recicladora ubicada en la ciudad de Lima, la materia prima fueron todo tipo de botellas de vidrio y colores donde se realizó lavado con abundante agua y se retiraron las etiquetas, en segundo lugar se realizó una primera reducción de tamaño de forma manual con una comba de 3Lbs, posterior a ello se volvió a retirar los residuos de etiquetas para luego trasladar el vidrio limpio hasta el laboratorio donde se utilizó la máquina de los Ángeles en ciclos de 3 a 5m para la reducción del tamaño, en cada ciclo se utilizó la malla N°4 para separar los tamaños mayores y reprocesarlos, este procedimiento se repitió hasta procesar el 100% de la materia prima.

Fig. 1 Vidrio reciclado.

C. Muestra

Se consideraron 120 probetas cilíndricas de 10x20cm, para la evaluación de la resistencia a la compresión, 60 prismas rectangulares de 7.5x7.5x28.5cm para la evaluación del cambio de longitud y 10 núcleos perforados para la resistencia a la compresión de núcleos perforados. Todas las muestras se dividieron en 1 concreto patrón y 4 concretos modificados con reemplazo de 5, 10, 15 y 20% de agregado fino por vidrio reciclado.

D. Normativa y ensayos utilizados

Para los agregados se realizaron ensayos de granulometría (NTP 400.012/ASTM C136), contenido de humedad (NTP 339.185), peso unitario (NTP 400.017/ASTM C 29) y absorción (NTP 400.022). Para el concreto en estado fresco se ensayó el asentamiento (NTP 339.035/ASTM C143), temperatura (NTP 339.184/ASTM C1064) y peso unitario compactado (ASTM C138). Por último, para el concreto endurecido se ensayó la resistencia compresión de probetas cilíndricas (NTP 339.034/ASTM C39), cambio de longitud de probetas prismáticos (ASTM C157) y resistencia compresión de núcleos perforados de losas de concreto (C42/C42M).

E. Procedimiento

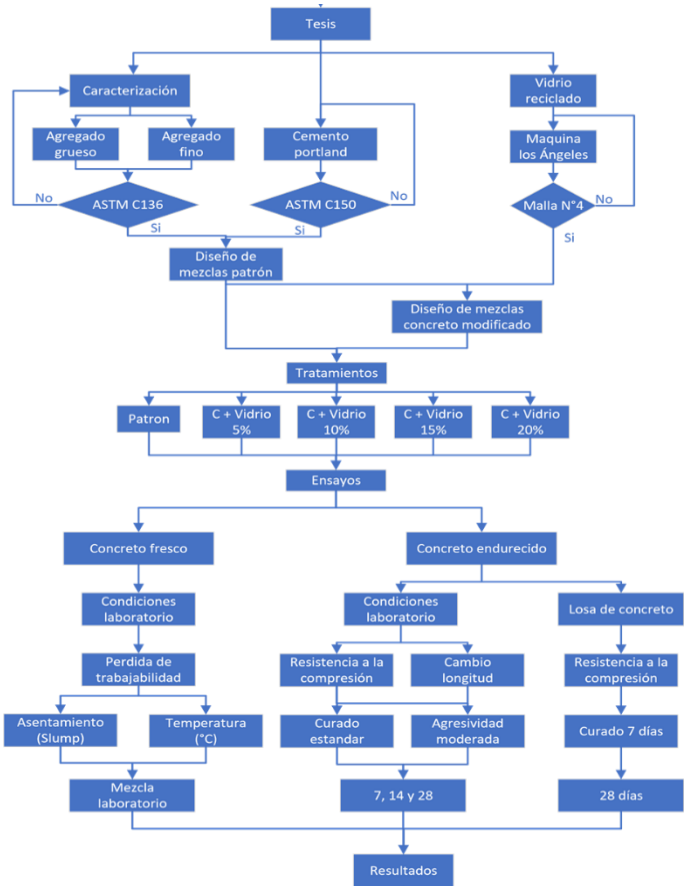

Fig. 2 Procedimiento de la investigación

III. Resultados y Discusión

A. Caracterización de agregado fino y grueso

Se cumplió con los estándares de que exige la norma [6] graficado en las Fig. 03 y Fig. 04 donde se constató que los agregados seleccionados están dentro de los rangos normativos que se muestran en la Tabla 01 y Tabla 02. Con estos datos, se puede indicar que los agregados son adecuados para la mezcla de concreto. Para el agregado fino de vidrio reciclado se grafica en la Fig. 04 y los resultados se muestran en la Tabla 03 donde se tomó como referencia los requerimientos para el agregado fino tradicional.

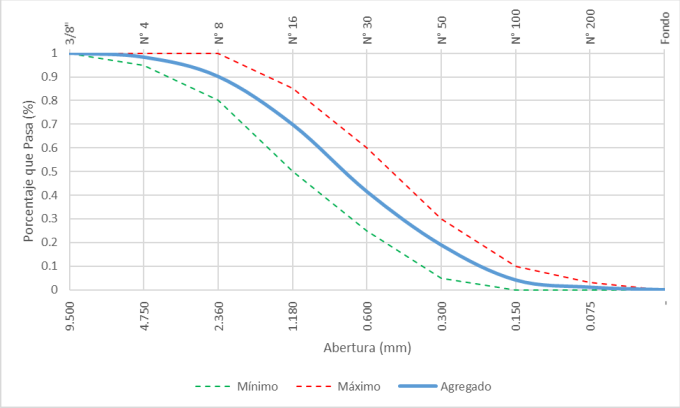

Fig. 3 Curva granulométrica de la arena.

TABLA I
REQUERIMIENTOS NORMATIVOS DE AGREGADO FINO - ARENA

Ensayos	Norma	Requerimiento	Result.
Contenido de humedad	ASTM C566	Según diseño	0.80 %
Peso unitario suelto	ASTM C29	Según diseño	1,644.00 Kg/m3
Peso unitario compactado	ASTM C29	Según diseño	1,813.00 Kg/m3
Peso específico base seca	ASTM C128	Según diseño	2.51 g/cm3
Peso específico base SSS	ASTM C128	Según diseño	2.53 g/cm3
Absorción	ASTM C128	≤ 3.00 %	0.80 %
Módulo de finura	ASTM C33	2.30 – 3.10	2.77
Material fino (Pasa tamiz #200)	ASTM C117	≤ 3.00 %	1.10 %

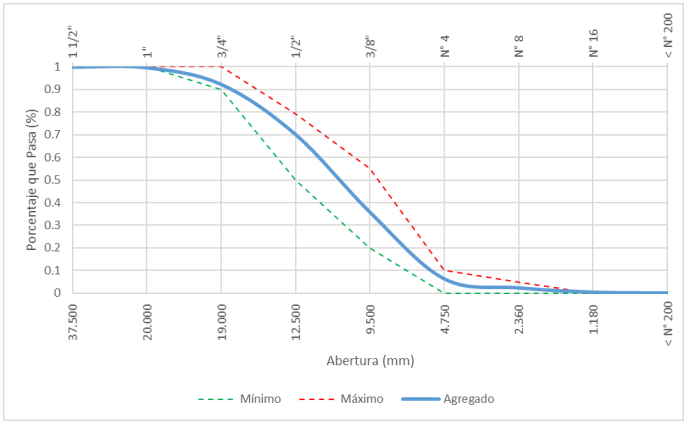

Fig. 4 Curva granulométrica de la piedra.

TABLA II
REQUERIMIENTOS NORMATIVOS DE AGREGADO GRUESO - PIEDRA

Ensayos	Norma	Requerimiento	Result.
Contenido de humedad	ASTM C566	Según diseño	0.70
Peso unitario suelto	ASTM C29	Según diseño	1,431.00 Kg/m3
Peso unitario compactado	ASTM C29	Según diseño	1,597.00 Kg/m3
Peso específico base seca	ASTM C128	≥ 2.4 g/cm³	2.40 g/cm3
Peso específico base SSS	ASTM C128	≥ 2.4 g/cm³	2.43 g/cm3
Absorción	ASTM C128	≤ 3 %	1.20
Módulo de finura	ASTM C33	No aplica (propio modulo finura)	6.63
Tamaño máximo nominal	ASTM C33	Según diseño	3/4"

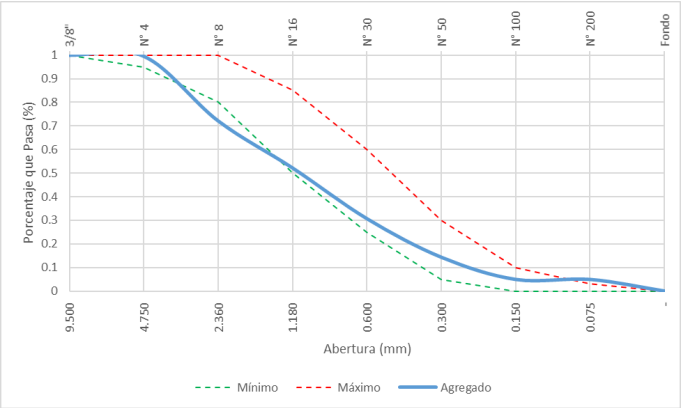

Fig. 5 Curva granulométrica del vidrio reciclado.

TABLA III
REQUERIMIENTOS NORMATIVOS DE AGREGADO FINO – VIDRIO RECICLADO

Ensayos	Norma	Requerimiento	Result.
Peso unitario suelto	ASTM C29	Según diseño	1,669.06 Kg/m3
Peso unitario compactado	ASTM C29	Según diseño	1,841.52 Kg/m3
Módulo de finura	ASTM C33	2.30 – 3.10	3.26

B. *Propiedades del concreto en estado fresco.*

Perdida de trabajabilidad se realizó en estado fresco durante la preparación de la mezcla para fabricar las probetas y primas del estudio, los resultados nos indican que la reducción de la trabajabilidad se dio dentro de lo aceptable para trabajo en campo y se muestra en la Fig. 06.

En el caso de la temperatura se utilizó un termómetro con un grado de precisión de 0.5°C y rango de 0-50°C en cumplimiento de la norma ASTM C1064, los resultados se mantuvieron en un rango de entre 22.50 a 23°C que se encuentra dentro de los 10 a 30°C en cumpliendo con la NTP E060.

El peso unitario compactado del concreto se muestra en la Fig. 07 donde se evidencia que se mantuvo el rango aceptable de 2300 a 2500 Kg/m3 en cumplimiento de la NTP E060.

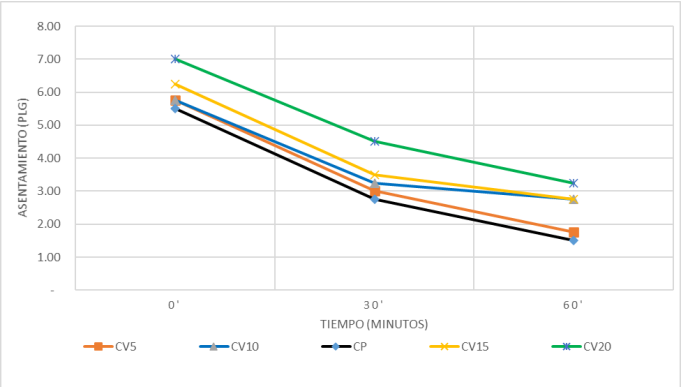

Fig. 6 Asentamiento de cada tratamiento 0', 30' y 60'.

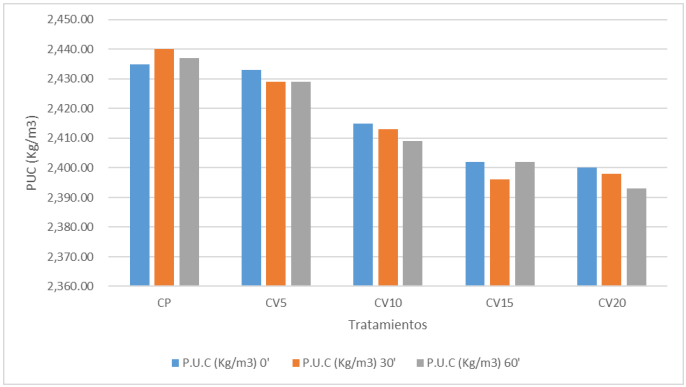

Fig. 7 PUC a los 0', 30' y 60'.

C. *Propiedades del concreto en estado endurecido.*

La **resistencia a la compresión** de probetas cilíndricas demostró que al sustituir agregado fino de gruesa por agregado fino de vidrio reciclado provoco un aumento en la resistencia a la compresión en todos los casos. Es importante resaltar que se observó un incremento máximo de la resistencia a la compresión en 7.20% y 14.41% en curado estándar y sulfatos S1 en el tratamiento C10V con el reemplazo del 10% en comparación con el concreto patrón, sin embargo, este rango de incremento se reduce a los 56 días como se muestra en la Fig. 8. También se observa que en ambos curados el incremento de la resistencia a la compresión llega a un máximo con el reemplazo del 10%, pasado este valor el incremento de resistencia a la compresión se reduce. Todos los casos se mantuvieron por sobre lo establecido por las normativas ASTM C39, ASTM C150 y la ACI 318-19.

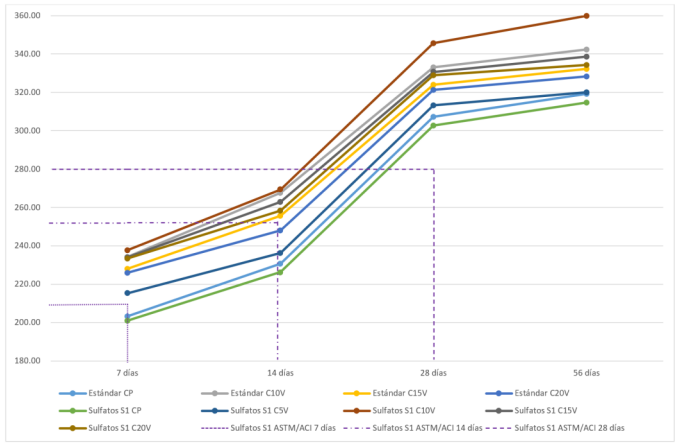

Fig. 8 Comparación de los promedios de resistencia a la compresión de cada tratamiento en el tiempo.

La resistencia a la compresión de núcleos perforados losa de concreto mostro un comportamiento similar a los del laboratorio como se muestra en la Fig. 9. Es importante resaltar que se observó un incremento máximo de la resistencia a la compresión en 7.52% con C10V implicando el reemplazo del 10% en comparación con el concreto patrón. Todos los casos se

mantuvieron por sobre lo establecido por las normativas ASTM C39, ASTM C150 y la ACI 318-19.

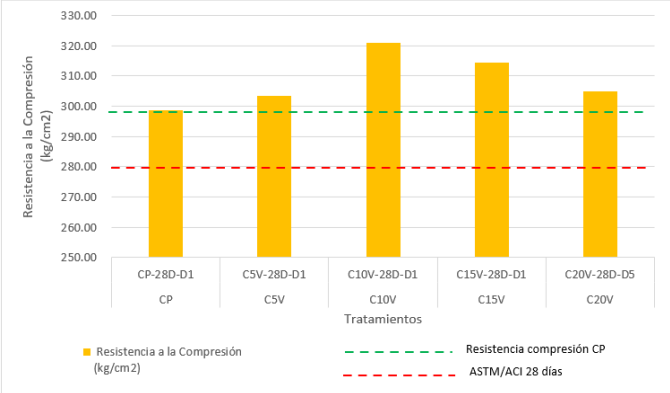

Fig. 9 Ensayo resistencia a la compresión a los 28 días de núcleos perforados.

El **cambio de longitud** de probetas prismáticas demostró que la sustitución de agregado fino por vidrio reciclado influyo en la reducción del cambio de longitud en el curado estándar de hasta un 35% en el caso del tratamiento C10V en relación al patrón a los 28 días y en el curado moderado sulfatos S1 de hasta un 19% en el caso del tratamiento C20V en relación al patrón a los 28 días, sin embargo a partir d ellos 56 días el concreto patrón es el de menor cambio de longitud como se muestra en la Fig 10.

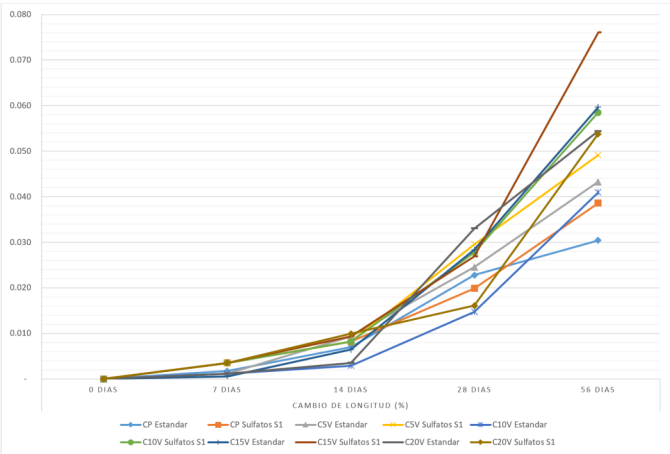

Fig. 10 Comparación del cambio de longitud (%) en el tiempo.

D. Comparativas con otras investigaciones

El concreto en estado fresco nos indica que la perdida de trabajabilidad es inversamente proporcional a la reducción del asentamiento del concreto en estado fresco. En la investigación se redujo el asentamiento cuando se incrementó el reemplazo de agregado fino de arena gruesa por agregado fino de vidrio reciclado. El asentamiento en los tratamientos con reemplazo de agregado fino por vidrio reciclado entre 10 y 15% redujeron la perdida de trabajabilidad hasta los 60', en el resto de rangos la perdida de trabajabilidad fue muy similar al concreto patrón concordando con [12], [13], [14] y [15] donde al estudiar el reemplazo del agregado fino en rangos de 5 a 20% de vidrio reciclado obtuvieron una reducción similar de la perdida de trabajabilidad, y [16] con reemplazos mayores al 50% calculo que la perdida de trabajabilidad fue muy similar al concreto patrón.

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión en concreto con reemplazo parcial de agregado fino por vidrio reciclado muestran un comportamiento positivo, especialmente con un reemplazo del 10% de vidrio reciclado (tratamiento C10V). A los 28 días, se observó un incremento significativo de la resistencia a la compresión tanto en condiciones de curado estándar como moderado en sulfatos S1, cumpliendo con las normativas ASTM C39, ASTM C150 y ACI 318-19. En particular para el caso de probetas cilíndricas, el C10V experimentó un aumento del 8.35% en comparación con el concreto patrón (CP) en curado estándar y un 14.21% en curado moderado con sulfatos S1. Este comportamiento es consistente con el aumento en la resistencia que se ha reportado en estudios previos. Al igual que el análisis de las probetas cilíndricas, los núcleos perforados de losas de concreto también revelaron mejoras notables. En el caso de los núcleos perforados, el tratamiento C10V mostró un incremento del 7.52% en la resistencia a la compresión a los 28 días en relación al concreto patrón. Estos resultados sugieren que el reemplazo de hasta el 10% de agregado fino por vidrio reciclado no solo mejora la resistencia en condiciones controladas de laboratorio, sino también en aplicaciones más cercanas a la práctica real. Sin embargo, cuando el reemplazo de agregado fino por vidrio reciclado superó el 10%, los incrementos en la resistencia a la compresión comenzaron a disminuir, especialmente después de los 7 días de curado. En los tratamientos con un reemplazo de vidrio reciclado superior al 10%, el incremento en la resistencia se volvió menos significativo a medida que transcurría el tiempo, lo que sugiere que, a partir de ciertas proporciones, el vidrio reciclado puede afectar la hidratación del cemento y otros aspectos de la química del concreto, reduciendo su efectividad a largo plazo similar a los estudios de [17] y [9] reportaron incrementos de hasta el 13% en la resistencia a la compresión al reemplazar entre el 25% y el 50% del agregado fino por vidrio reciclado. Esto respalda la hipótesis de que el vidrio reciclado puede actuar como un sustituto efectivo del agregado fino, especialmente en proporciones moderadas. Sin embargo, [15] y [18] indicaron que los reemplazos menores al 15% no generaron mejoras significativas en la resistencia, lo que también se observa en nuestros resultados con reemplazos cercanos al 10%.

Sobre el cambio de longitud el reemplazo de agregado fino por agregado fino de vidrio reciclado es importante debido a su potencial como material sostenible, sin embargo el uso de este material como sustituto está condicionado debido a su posible comportamiento en la reacción álcali-silice (ASR) si no es manejado de manera adecuada y puede comprometer la

durabilidad del concreto cuando el cambio de longitud no está dentro de los límites recomendados por la ASTM C1260 y la ACI 201.2R-01 para el curado estándar y moderado en sulfatos S1 donde nos indican que no se debe superar el cambio de longitud sobre 0.10% hasta los 14 días o 0.20% hasta los 28 días y evitar la reducción de la durabilidad del concreto. En el caso del curado estándar se observó que para el C10V se reducía hasta un 35% en relación al patrón a los a los 28 días, siendo ambos los de menor cambio de longitud. Para el curado moderado en sulfatos S1 se mantuvo prácticamente igual hasta los 14 días, pero, a los 28 días el C20V y concreto patrón fueron los de menor cambio de longitud en comparación con los demás tratamientos, sin embargo pasado los 56 días el de menor cambio de longitud fue el concreto patrón muy similar a [10] que al sustituir agregado fino por vidrio reciclado logro mantener el cambio de longitud por debajo del límite de 0.15%, para [11] y [19] al utilizar reemplazos mayores al 30% de agregado fino por vidrio reciclado a los 28 días todos los tratamientos se mantuvieron por debajo de 0.05%.

V. Conclusiones y recomendaciones

El uso de vidrio reciclado en reemplazo del agregado fino disminuyó significativamente la pérdida de trabajabilidad a los 60 minutos, lo cual podría beneficiar a proyectos con tiempos prolongados de trabajo.

La sustitución de hasta un 10% de arena por vidrio reciclado resultó en un aumento en la resistencia a la compresión a los 56 días en curado estándar y moderado en sulfatos S1.

En cuanto al comportamiento del concreto frente al cambio de longitud, tratamiento con reemplazo de 10% de agregado fino por vidrio mostró una reducción del cambio de longitud hasta los 28 días y para el curado moderado en sulfatos S1 se mantuvo prácticamente igual hasta los 14 días, pero, a los 28 días el concreto el reemplazo de 20% redujo el cambio de longitud hasta un 19% y fue muy similar al concreto patrón en comparación con los tratamientos. Sin embargo, el cambio de longitud fue menor a partir de los 56 días en el concreto patrón.

El uso de vidrio reciclado como agregado fino contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir residuos y aprovechar un material potencialmente puzolánico. Además, mejora ciertas propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión, y no se ve afectado su durabilidad debido a que se encuentra bajo lo recomendado por las normas para el cambio de longitud por lo que se recomienda realizar estudios a más largo plazo sobre la durabilidad del concreto con vidrio reciclado en diferentes condiciones ambientales.

Referencias

[1] Banco Mundial. “Desarrollo urbano”. Boletín semanal del Grupo Banco Mundial. (2023). https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview.

[2] Instituto Peruano de Economía. “Crecimiento del PBI del sector construcción y contribución según tipo de obras,

[3] Instituto Nacional de Estadística e informática. “Informe técnico Avance Coyuntural de la Actividad Económica”. Perú.

[4] Asociación de Desarrolladores Inmobiliarios del Perú. “ADI Perú: ocho de cada 10 casas son autoconstruidas y altamente vulnerables”. Perú

[5] Cavero, M. “Contratos, riesgo sísmico y autoconstrucción”. Enfoque inmobiliario. El Peruano. Perú.

[6] ONU Medio Ambiente. (2018). Plásticos de un solo uso: Una hoja de ruta para la sostenibilidad. Revista ONU.

[7] Devaraj, R., Jordan, J., Gerber, C., Olofinjana, A. (2021). Exploring the Effects of the Substitution of Freshly Mined Sands with Recycled Crushed Glass on the Properties of Concrete. Applied Sciences 11(8):3318. https://doi.org/10.3390/app11083318.

[8] Abhyankar, S., Chouragade, M. (2020). Environmental Aspects of Concrete and Use of Waste Glass. Helix - The Scientific Explorer 10(01), 137-139. https://doi.org/10.29042/2020-10-1-137-139.

[9] Segura, L., Sigüenza R., Solar M., Zamora, J. (2022). Efecto del uso de vidrio reciclado en el diseño de concreto. Revista Universidad y Sociedad 14(1), 179-192. https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2547/2496.

[10] Abalouch, I., Sakami, S., Elabbassi, F., Boukhattem, L. (2021). Effects of Recycled Fine Glass Aggregates on Alkali Silica Reaction and Thermo-Mechanical Behavior of Modified Concrete. Applied Sciences 11(19):9045. https://doi.org/10.3390/app11199045.

[11] Mariaková, D., Mocová, K., Fořtová, K., Pavlů, T., Hájek, P. (2022). Alkali-silica Reaction Elimination Potential of High-Performance Concrete Containing Glass Powder. Materials 15(19):6574. https://doi.org/10.3390/ma15196574.

[12] Abhyankar, S., Chouragade, M. (2020). Environmental Aspects of Concrete and Use of Waste Glass. Helix - The Scientific Explorer 10(01), 137-139. https://doi.org/10.29042/2020-10-1-137-139.

[13] Lai, M., Lu Z., Luo, Y. Ren, F., Cui, J., Wu, Z., Ho, J. (2024). Pre- and post-fire behaviour of glass concrete from wet packing density perspective. Journal of Building Engineering 86:108758. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108758.

[14] López, D., Azevedo, C., Barbosa. E. (2005). Evaluation of physical and mechanical properties of concretes produced with ground waste glass as fine aggregate. Cerâmica 51(320), 318-324. https://www.researchgate.net/publication/262479600.

[15] Saleh, A., Hama, S. (2023). Influence of Incorporating Waste Glass Powder and Fine Waste Plastic Aggregate on Fresh and Hardened Properties of Structural Concrete. E3S Web of Conferences 427:02223. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342702003.

[16] Mohamed, A, Abdull M., Ibrahim, S., Mostafa S. “Effect of industrial wastes on the properties of sustainable ultra-high-performance concrete: Ganite, ceramic, and glass”. Construction and Building Materials 428 (2024) 136292. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136292

[17] Al-Awabdeh, F., Al-Kheetan, M., Jweihan, Y., Al-Hamaiedeh, H., Ghaffar, S. (2022). Comprehensive investigation of recycled waste glass in concrete using silane treatment for performance improvement. Results in Engineering 16:100790. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100790.

[18] Muhedin, D., Ibrahim, R. (2023). Effect of waste glass powder as partial replacement of cement & sand in concrete. Case Studies in Construction Materials 19:e02512. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512.

[19] Guojun K., Wengui L., Ruyi L., Yuelin L. George W. (2018). “Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali–Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite”. International Journal of Concrete Structures and Materials. 12:67. https://doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7.