

# Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio

M. Rodríguez<sup>(1)</sup>, M. Ruiz<sup>(2)</sup>.

<sup>1</sup> Rodar – Empresa Constructora, Córdoba, Argentina

<sup>2</sup> Prof. Asociado. Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 10/03/2016

Fecha de aceptación del manuscrito: 25/04/2016

Fecha de publicación: 30/09/2016

**Resumen**—La producción de desechos en las grandes ciudades es un problema que ha conducido a la realización de una serie de estudios tendientes al aprovechamiento de los residuos. Entre los residuos urbanos más comunes se encuentra el vidrio. Este material puede reciclarse para la fabricación de nuevos envases y vajilla aunque la dificultad para transportar el vidrio de desecho desde el sitio donde se genera hacia las cristalerías que lo reciclan sugiere la posibilidad de buscar disposiciones alternativas para este material. Una de estas alternativas es integrarlo a algún proceso productivo como la fabricación de hormigón en reemplazo parcial del cemento de la mezcla.

En el presente trabajo se analizó cómo afecta la incorporación de vidrio de desecho finamente molido la resistencia del hormigón y la reacción álcali-sílice de la mezcla. Siguiendo los estudios disponibles en la literatura se llevaron a cabo mezclas con distintos porcentajes de reemplazo de cemento. Los primeros resultados de este estudio, que aún se encuentra en ejecución, indican que el vidrio molido, en el tamaño utilizado, se comporta como una puzolana. Aunque el reemplazo de parte del cemento en la mezcla reduce su resistencia en edades tempranas, en comparación con mezclas sin vidrio, su resistencia es mayor a las esperadas para mezclas con igual contenido de cemento. Se encontró además que el vidrio inhibe significativamente la reacción álcali sílice, aún cuando se utilizan áridos reactivos y que la reducción de resistencia referida anteriormente no es significativa para edades avanzadas.

**Palabras clave**—micro partículas de vidrio, puzolanas, cemento, reciclado.

**Abstract**— The production of urban wastes is a problem that has led to the conduction of a series of studies focused on how this wasted material can be reused. Among the most common urban waste is glass. This material may be recycled to manufacture new bottles and tableware although difficulties in transporting the waste glass from the site where it is generated to the recycling facility suggests the possibility of seeking alternative uses for this material. One such alternative is to integrate it into a production process such as the manufacture of concrete, in partial replacement of cement.

This paper discusses the impact of the incorporation of finely ground waste glass on concrete strength and alkali-silica reaction. Following the studies available in the literature tests were conducted on concrete with different cement replacement percentages. The first results of this study, which is still in progress, indicate that micro-particles of glass behave as a pozzolan. Although replacement of the cement with finely milled glass in the mix reduces its strength at early ages (as compared with mixtures without glass) its resistance is greater than expected for mixtures with the same cement content. Furthermore, this reduction of resistance due to the incorporation of glass to the mixture is not significant to advanced ages. In addition to that, it was found that the finely ground glass significantly inhibits alkali silica reaction, even when reagent aggregates are used.

**Keywords**— glass particles, pozzolana, Portland cement, recycling.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo a información proporcionada por el Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, durante 2011 se generaron en el país más de 14.000.000 de toneladas de residuos, de los cuales un 5% corresponden a vidrio de distinto origen [1]. Si bien la información recabada indica una tendencia creciente en la cantidad anual de residuos reciclables recuperados [2] y [3],

en la ciudad de Córdoba se rescata sólo el 1,5% del vidrio de desecho, mientras que el resto de ese material se dispone en rellenos sanitarios.

Razones económicas y ambientales demuestran la inconveniencia de esta clase de disposición entre las que se cuentan el aumento de los costos en los servicios de recolección y descarga de residuos, la escasez de lugares para rellenos y el alza de precios de los terrenos, la naturaleza no biodegradable del vidrio y la existencia de regulaciones ambientales cada vez más estrictas [4].

La reutilización del vidrio reciclado, limpio y triturado denominado calcín, que se incorpora hasta en un 10% como materia prima en la fabricación de envases y vajilla nueva [5], trae consigo el riesgo de incrementar algunos defectos

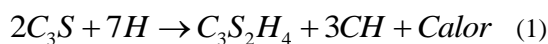
<sup>2</sup> Dirección de contacto:

Miguel E. Ruiz, Casilla de Correo 916, Correo Central, 5000 – Córdoba / Fax +54 351 4334144, Tel: 5353800 int. 711, mruiz@efn.uncor.edu.

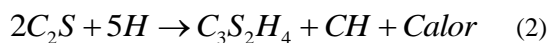
del vidrio, debido a las impurezas metálicas que puede introducir en las nuevas mezclas [6]. Además, deben considerarse los costos asociados a la separación de los vidrios por color y a los costos del transporte hacia las plantas que reutilizan el vidrio, que en el caso de la de la ciudad de Córdoba, se encuentran a más de 600 km. En este marco, surge la alternativa de integrar el vidrio a la fabricación de hormigón, que constituye uno de los materiales más utilizados en nuestro medio para obras civiles.

El uso de vidrio reciclado molido en mezclas de hormigón estructural ya se ha estudiado en otros países. El fundamento radica en los procesos químicos que tienen lugar en el proceso de hidratación de los silicatos tricálcicos  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (comúnmente denominada  $\text{C}_3\text{S}$  o alita) y silicatos dicálcicos  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$  o belita), cuando la cal libre  $\text{Ca(OH)}_2$  ( $\text{CH}$  o portlandita) resultante de la hidratación primaria de los silicatos de calcio reacciona con la sílice amorfa provista por el vidrio que se incorpora a la mezcla generando compuestos puzolánicos secundarios.

Las ecuaciones (1) y (2) muestran los productos resultantes de la hidratación primaria de los silicatos componentes del cemento, El producto principal es el hidrato de silicato cálcico denominado C-S-H, que es una materia no cristalina (geliforme) de composición variable ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4$  es sólo una aproximación), por el contrario, el hidróxido de calcio generado es un material cristalino de composición fija.

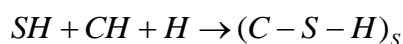


(silicato tricálcico) (agua) (C-S-H) (cal libre)



(silicato tricálcico) (agua) (C-S-H) (cal libre)

Mientras tanto la creación de compuestos secundarios (C-S-H)<sub>s</sub> asociados a reacciones puzolánicas puede expresarse como en la ecuación (3)



(3)

(sílice reactiva) (cal libre) (agua) (C-S-H de hidratación secundaria)

Algunos ejemplos de materiales con comportamiento puzolánico son las cenizas volcánicas (puzolanas naturales); escorias de fundiciones de acero; la micro sílice o humo de sílice; meta caolines [7] procedentes del tratamiento térmico del caolín y las cenizas volantes procedentes de la combustión de productos agrícolas como las cenizas provenientes de la quema de la cascarilla de arroz [8] o de la paja de la caña de azúcar [9].

Tal como se lo señalara anteriormente, los conceptos sintetizados en las expresiones anteriores permiten aceptar que el vidrio molido a escala de micro partícula debería tener un potencial comportamiento puzolánico. Con este objeto se desarrolló la investigación cuyos resultados principales se exponen en esta publicación.

En [4] se utilizan micro partículas de vidrio de 25  $\mu\text{m}$  en reemplazo de cemento al 15%, 20%, y 23%, obteniendo

resistencias superiores a la mezcla sin vidrio para los casos con 15% y 20% de vidrio, a partir de los 90 días. En [10] los autores estudian mezclas con partículas de 38  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$  y obtienen resultados similares a los de [4] para el reemplazo de 30% de cemento usando partículas de 38  $\mu\text{m}$ .

Los estudios [11] y [12] trabajan con arenas y polvo de vidrio y muestran que si bien no logran alcanzar la resistencia de las probetas patrón, la adición de polvo de vidrio permite lograr hormigones que superan los 40 MPa.

En [13] se evalúa la actividad puzolánica de las micro partículas a través de ensayos de termo gravimetría, conductividad eléctrica, Chappelle Modificada e índice de actividad puzolánica. Los investigadores concluyen que, si bien presentan correlación puzolánica en los ensayos mencionados, antes de usarse el vidrio molido en las mezclas cementicias deben realizarse estudios de Reactividad Alcali-Sílice (RAS).

Tal como se ha indicado, las investigaciones en otros países muestran resultados positivos cuando se utiliza vidrio finamente molido como una adición en hormigones. Sin embargo, los autores de este artículo no han encontrado evidencia de investigaciones similares a las resumidas anteriormente en nuestro país. Debido a ello, en esta investigación se buscó evaluar la factibilidad de reutilizar el vidrio de desecho en mezclas de hormigón a partir de la tecnología y equipamiento disponible en nuestro Laboratorio.

La reducción de cemento en las mezclas de hormigón podría ser importante si se tiene en cuenta los volúmenes de este material que se usa en la actualidad. Como referencia, puede decirse que en la última década el consumo de cemento en nuestro país se ha incrementado, de 5 millones de toneladas en 2003 hasta 12 millones de toneladas en 2013 [14]. A nivel mundial se producen alrededor de 4.000 millones de toneladas de cemento anuales [15].

La reducción en el consumo de cemento portland disminuiría la producción industrial del clinker, su principal componente. Este proceso industrial, que incluye la calcinación de cales y arcillas a más de 1400°C, genera altas cantidades de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos como  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y partículas volantes. Se estima que para producir una tonelada de cemento se libera a la atmósfera una tonelada de  $\text{CO}_2$ . A nivel mundial del 5 al 8% del  $\text{CO}_2$  emanado por la actividad industrial es debido a la producción del cemento [16]. De este modo, la reducción de producción de clinker reportaría un beneficio ambiental directo. Adicionalmente, la fabricación de cemento es también un proceso de alto consumo energético, que ocupa el tercer lugar después de la fabricación de aluminio y acero. Cerca de 5,5 millones de BTU (5,8 millones de kJ) se consumen para la producción de una tonelada de cemento. En términos relativos, la energía consumida para la fabricación del cemento representa el 90% de la energía consumida para la elaboración del hormigón [4]. Todas estas características del cemento y su proceso productivo muestran que existiría un beneficio claro, desde el punto de vista ambiental, en la reducción de los volúmenes de producción.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar las características de un hormigón con la introducción de vidrio reciclado molido como reductor de cemento, se investigaron dos posibles efectos de este tipo de adición utilizando distintos porcentajes de reemplazo de cemento por vidrio molido. En primer término, se analizó el comportamiento ante la RAS del vidrio mediante ensayos de reactividad alcalina potencial. En segundo término, se investigó la influencia del vidrio molido, tanto en las propiedades del estado fresco de pastones de hormigón, como de la resistencia a la compresión en probetas de hormigón endurecido a diversas edades. Los resultados de estos ensayos (propiedades de hormigón fresco, RAS y de resistencia) se presentan en este artículo.

### Tipo de vidrio a utilizar

Como es conocido, existe una amplia gama de vidrios con distintas características y componentes. Las principales empresas recicladoras de la ciudad de Córdoba (Pratto Reciclados y Fénix Reciclados S.R.L.) indicaron que la mayor parte de los residuos de vidrio corresponde al soda-cálcico o Tipo A.

El vidrio soda cálcico es el vidrio comercial más común y el menos costoso. Sus componentes principales son: óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$  71-73%), óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$  12-14%) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$  10-12%). Se utiliza principalmente para la fabricación de envases (botellas, jarros, vasos de uso diario) y vidrio para ventanas (en la industria de la construcción y automotriz). La proporción en que se encuentran algunas impurezas en la materia prima afecta a la coloración del vidrio, fundamentalmente el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Los vidrios soda cálcicos de color verde tienen la mayor concentración de estas impurezas (hasta un 7% en peso), en tanto que el ámbar y el incoloro tienen una menor proporción (2,5% y 0,5% respectivamente) [17].

Con el objeto de alcanzar una buena representación del material potencialmente reciclable, se decidió mezclar los vidrios soda cálcicos (residuos de botellas, frascos y envases) de distintos colores, según la proporción de mezcla informada por Fénix Reciclados S.R.L. Esta empresa indicó que el material que reciben en su centro de reciclado comprende un 70% de vidrio verde, 25% de incoloro y 5% de color ámbar. Estas proporciones se mantuvieron a lo largo de todo el estudio.

Si bien la bibliografía es contradictoria respecto al comportamiento ante la RAS según el color del vidrio [18-19], ésta decisión es consistente con otros trabajos, que prueban el comportamiento puzolánico de este tipo de vidrio [4, 13], e indican que la fabricación de los vidrios soda-cálcicos constituye alrededor del 90% de todo el vidrio producido [11].

El vidrio se recolectó de diversos sitios de la ciudad y consistió en botellas frascos y otros recipientes en general. Se llevó a cabo un proceso de limpieza profunda, se retiraron las etiquetas y elementos plásticos y de metal. Luego se separó el material según los colores verde, incoloro y ámbar. Cuando se halló completamente seco, se lo redujo mediante golpes con una maza, para luego triturarlo en un molino de martillos Braun, la molienda se

completó con una segunda etapa en la cual el material se pasó por un molino de discos Braun. Se tamizó el material con tamices normalizados #100 y #200 de la serie IRAM en una zaranda vibratoria, obteniéndose las granulometrías deseadas separadas por color, lo que permitió hacer la mezcla de colores en los porcentajes referidos.

### Granulometría del vidrio molido y porcentajes de adición

En [10], los autores indican que, para que el vidrio molido actúe como una puzolana, el tamaño de partícula máximo a utilizar debiera ser menor a  $150\ \mu\text{m}$ , lo que equivale a un tamaño de partícula pasante tamiz #100 (P#100). De la molienda del vidrio reciclado decidió utilizarse la fracción que cumpla tal requisito, lo que se muestra en la Fig. 1. Allí se observan las curvas de frecuencia relativa y acumulada de las partículas según su tamaño. Como referencia, se indican líneas representativas de las mallas de tamiz #100 y #200. Todas las partículas a la izquierda de la línea de tamiz #200 (P#200) presentan un tamaño máximo menor a  $75\ \mu\text{m}$  y representa una fracción mayor al 65% del total de pasante tamiz #100. Debido a que las puzolanas presentan mayor actividad como tales mientras más finamente divididas se encuentran, se decidió utilizar para la elaboración de las probetas para estudiar la resistencia de la mezcla la fracción P#200 del vidrio molido.

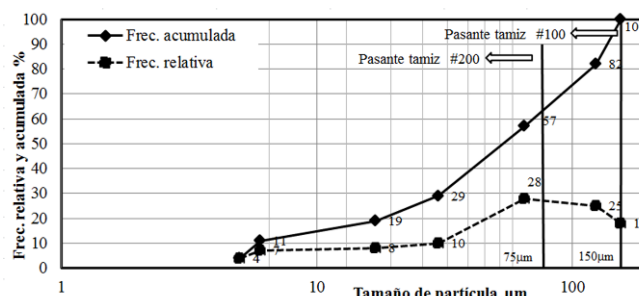


Fig. 1: Distribución granulométrica del vidrio molido P#100.

Cabe destacar que estudios más rigurosos hallados utilizan tamaños medios de  $9\ \mu\text{m}$  a  $25\ \mu\text{m}$  [4, 13], pero las instalaciones disponibles no permitieron obtener y separar la cantidad suficiente de material en ese tamaño para realizar el presente estudio.

Como se indicara anteriormente, en este estudio se llevaron a cabo pruebas de resistencia de probetas de hormigón y mediciones en barras de mortero para determinar reactividad RAS. Para las primeras pruebas se reemplazaron distintos porcentajes de cemento por vidrio molido P#200 (tamaño medio  $41\ \mu\text{m}$ ), mientras que para el segundo grupo de ensayos se empleó vidrio molido más grueso, es decir P#100 y R#200 (tamaños medios de  $82\ \mu\text{m}$  y  $137\ \mu\text{m}$ ).

Los porcentajes de reemplazo de cemento, tanto para las pruebas de resistencia como de reactividad, fueron 15%, 20% y 25%, acorde a lo indicado en [4], cuyos resultados se intentaron confirmar en esta investigación utilizando materiales y tecnología local disponible.

### ***Elaboración de barras de mortero: Determinación de reactividad alcalina potencial***

Para determinar la reactividad potencial, se utilizó el Método Acelerado de la Barra de Mortero según norma IRAM 1674. En este ensayo las barras preparadas deben permanecer un cierto período de tiempo expuestas a una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1 N a 80 °C. Si la expansión longitudinal medida a 16 días es menor que 0,1%, el agregado no es reactivo, si es mayor que 0,2% se lo debe considerar reactivo; y si está comprendida entre 0,1 a 0,2%, el resultado no es definitorio y se deben ampliar los estudios para determinar las condiciones de uso.

Se elaboraron tres morteros con agregados finos (arenas) de diferentes reactividades conocidas (no reactiva, potencialmente reactiva y reactiva) y dos granulometrías de vidrio: pasante malla #100 (P#100) y fracción retenido malla #200 - pasante malla #100 (R#200).

**TABLA 1:** ENSAYOS DE REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL POR EL MÉTODO DE LA BARRA DE MORTERO.

	<b>Mortero I</b>	<b>Mortero II</b>	<b>Mortero III</b>
<b>Arena</b>	Potencialmente reactiva	No reactiva	Altamente reactiva
<b>Cemento</b>	CPN 40	CPN 40	CPN 40
<b>Relación a/c</b>	0,47	0,47	0,52
<b>Granulometría a vidrio</b>	T <sub>med</sub> 82µm	T <sub>med</sub> 137µm	T <sub>med</sub> 137µm
<b>% de vidrio molido</b>	25% V	20% V	15% y 25% V

### ***Elaboración de probetas de hormigón con reemplazo parcial de cemento por vidrio molido: Ensayos de resistencia del hormigón***

Con el objeto de estudiar cómo afecta la resistencia del hormigón la reducción del contenido de cemento y su reemplazo parcial por vidrio molido, se elaboraron pastones de hormigón según la norma IRAM 1534. Se utilizó vidrio molido P#200 en proporciones de 0% (control) y 20%. En la primera etapa de esta investigación se formularon pastones con distinto porcentaje de vidrio (15%, 20% y 25%) pero se halló, como principal resultado en relación a la resistencia del concreto obtenido, que el mejor comportamiento se obtenía con el pastón en el que se reemplazó el cemento con 20% de vidrio. Por este motivo, la continuidad del estudio se llevó a cabo con este porcentaje de reemplazo. Los resultados de esa primera etapa del estudio se han publicado en [21]. El porcentaje de vidrio implica una reducción de igual proporción en el contenido de cemento, por lo que se mantuvieron fijas las cantidades del resto de los componentes de la mezcla; se asumió que el vidrio forma parte del material aglomerante (cemento). Las dosificaciones para 1 m<sup>3</sup> de Hormigón y las propiedades de los distintos pastones en estado fresco se presentan en la Tabla 2.

Se fijó como parámetro de diseño de la mezcla un hormigón que alcanzara, como mínimo, 25 MPa de resistencia promedio a los 28 días. El tratamiento de los agregados para la mezcla se llevó a cabo siguiendo las normas IRAM 1505, 1520, y 1533. Es de notar que debido a las dimensiones de las probetas utilizadas (10x20 cm) se

adoptó un agregado grueso con tamaño máximo de 12,5 mm.

Las probetas se mantuvieron sumergidas en las piletas que posee el Laboratorio de Estructuras a nivel subsuelo, desde su desmolde hasta algunas horas antes de ser sometidas al ensayo de compresión, tal como se indica en Norma IRAM 1534. Las piletas contienen solución saturada de cal y la cámara está a una temperatura controlada de 23 ± 2 °C.

En estado endurecido se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en probetas de 10x20 cm y de 15x30 cm, a las edades de 7, 28, 56, 120 y 270 días según norma IRAM 1546, utilizando una prensa Ibertest HIB 150.

**TABLA 2:** DOSIFICACIÓN DE PASTONES Y PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

<b>Denominación</b>	<b>Patrón 0% de Vidrio</b>	<b>Adición de Vidrio (20%)</b>
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	371	297
Vidrio mezcla P#200 (kg)	-	74
Agregado Grueso (kg)	1023	1023
Agregado Fino (kg)	834	834
Agua (kg)	211	211
Relación a/c	0,57	0,57
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2,29	2,27
Asentamiento (cm)	4,0	4,5
Contenido de aire (%)	4,5	4,5
Plasticidad	Muy buena	Muy buena

## **RESULTADOS**

### ***Ensayos sobre reactividad álcali-sílice***

Los ensayos realizados para evaluar la RAS con morteros elaborados con mezcla de cemento y vidrio molido (en los porcentajes y tamaños señalados anteriormente) mostraron resultados satisfactorios en cuanto a que el vidrio molido estaría inhibiendo la reacción.

Debido a que se usaron agregados de distintas reactividades comprobadas se logró poner en evidencia que el vidrio molido (pasante #100) no produce reacciones adversas en la mezcla, sino que además genera una acción favorable en la inhibición de la RAS.

A los efectos de ilustrar estos resultados se ofrecen la Fig. 2, Fig. 3. y Fig. 4, en las que puede apreciarse claramente el efecto inhibitor de la RAS que generan las micro partículas de vidrio. Si se observa la Fig. 2, correspondiente a una mezcla de mortero con árido potencialmente reactivo, se observa que la probeta de control (0% de vidrio) experimentó un alargamiento significativamente superior a la probeta elaborada con un reemplazo del 25% de cemento por vidrio molido (P#100). En la Fig. 3 se observa un resultado consistente con el anterior, ya que se muestra cómo el uso de una arena no reactiva produce resultados idénticos en la probeta de control y en la probeta con mezcla de cemento y vidrio molido. Cabe mencionar que esta arena fue la utilizada como árido fino para la elaboración de los pastones de

hormigón para estudiar su resistencia, resultados que se discuten a en el siguiente apartado.

Finalmente, la Fig. 4 ilustra claramente el efecto estabilizador del vidrio molido. Allí se grafican los resultados del ensayo realizados en probetas con mezclas elaboradas con arenas altamente reactivas, tanto para los elementos de control como para las probetas con vidrio, en donde se reemplazó un 15% y un 25% del cemento con micro partículas R#200. Se observa que, a pesar de utilizar arena reactiva, el ensayo resultó satisfactorio para la mezcla con 25% de vidrio, mientras que la probeta de control presentó un comportamiento por fuera de los límites establecidos: a los 7 días presentó fisuras superficiales en concordancia con un alargamiento excesivo, lo que indica la presencia de gel de RAS en su interior. Debido a que la probeta con 15% mostró una expansión significativamente menor a la probeta de control, pero mayor al 0,1 % se procedió a realizar estudios complementarios para determinar o descartar la presencia de gel de RAS en su matriz.

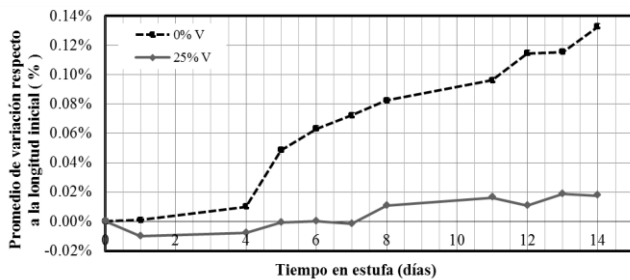


Fig. 2: Ensayo RAS en barras elaboradas con Mortero I

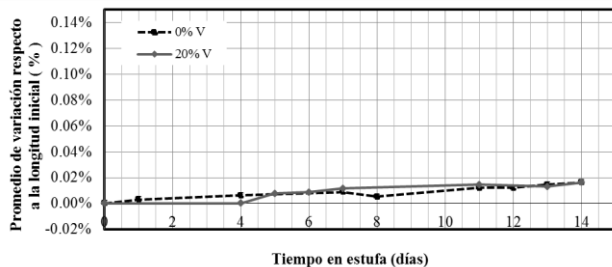


Fig. 3: Ensayo RAS en barras elaboradas con Mortero II

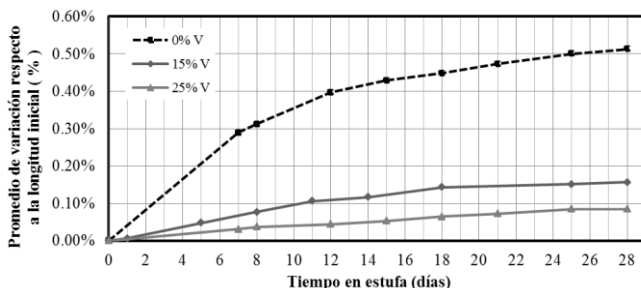


Fig. 4: Ensayo RAS en barras elaboradas con Mortero III

En la Fig. 5 se ilustran las probetas construidas utilizando el Mortero III en donde se aprecia claramente la aparición de importantes fisuras en los elementos sin vidrio molido, pero no existen fisuras en las probetas donde se incorporó un 15% y un 25% de vidrio molido.



Fig. 5: Fisuras en probetas sin adición de vidrio luego del ensayo RAS

Los resultados obtenidos para las barras del Mortero III motivaron la realización de ensayos petrográficos con el objeto de identificar la formación de geles. Para ello se realizaron cortes delgados longitudinales y transversales en las probetas ensayadas cuya vista de microscopio se ilustra en las Fig. 6 a Fig. 9. La Fig. 6 y Fig. 7 corresponden a la probeta con 0% de adición de vidrio que mostró la existencia de RAS. Como consecuencia, se observa claramente la rotura de la matriz interna, las fisuras y poros están rellenos de gel de RAS. Por el contrario, en la Figura 8 correspondiente a la probeta con 25% de adición de vidrio y la Figura 9, que corresponde a la probeta con 15% de adición de vidrio las partículas de vidrio poseen una buena adherencia a la matriz cementicia, no hay fisuras y no se detecta presencia de gel debido a RAS.

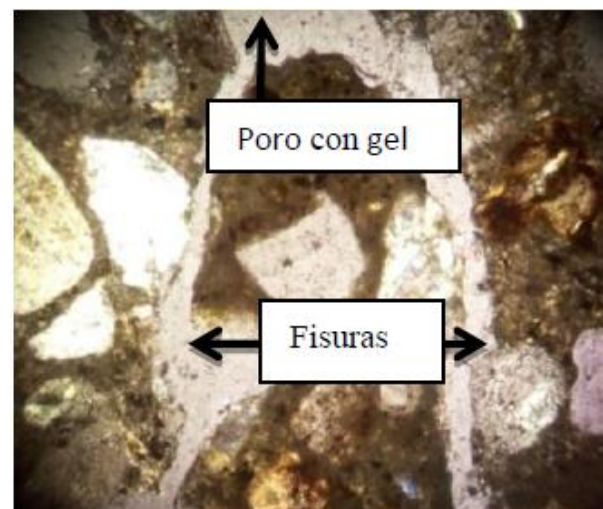


Fig. 6: Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III sin adición de vidrio.

### Ensayos de resistencia del hormigón con reemplazo parcial de cemento por vidrio molido

La acción del vidrio molido como puzolana en el hormigón se evaluó en términos de la resistencia de las probetas elaboradas. Para ello, se realizaron ensayos de compresión simple en probetas de hormigón patrón (0 % de

adición de vidrio) y en probetas en donde se había reemplazado 20% del cemento con vidrio molido P#200. Los resultados obtenidos se describen en los siguientes párrafos.

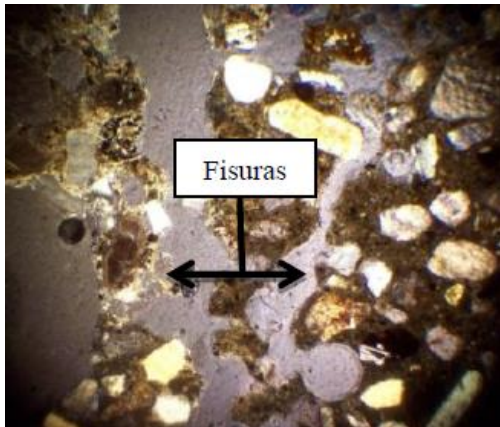


Fig. 7: Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III sin agregado de vidrio.

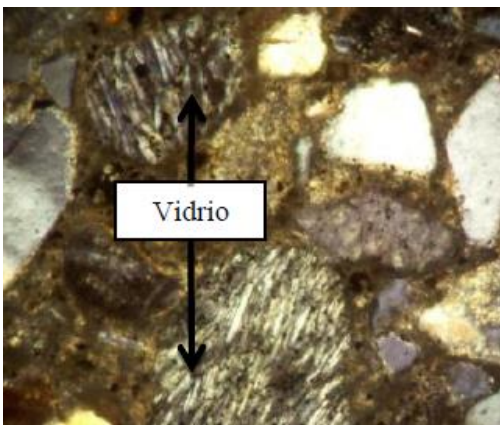


Fig. 8: Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III con 25% de adición de vidrio.

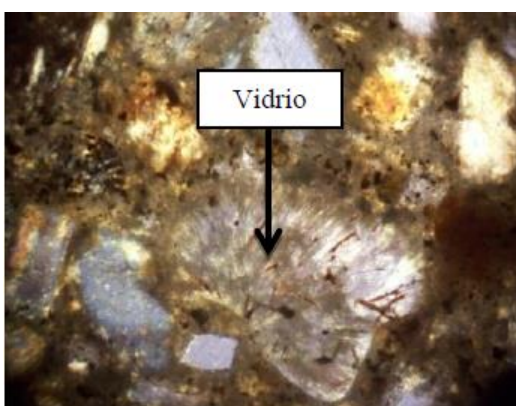


Fig. 9: Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III con 15% de adición de vidrio.

Los ensayos de compresión simple se ejecutaron en probetas de hasta 270 días de curado, con el objeto de verificar la acción de la adición de vidrio como puzolana. En la Fig. 10 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de los distintos pastones elaborados, según las edades de rotura de las probetas.

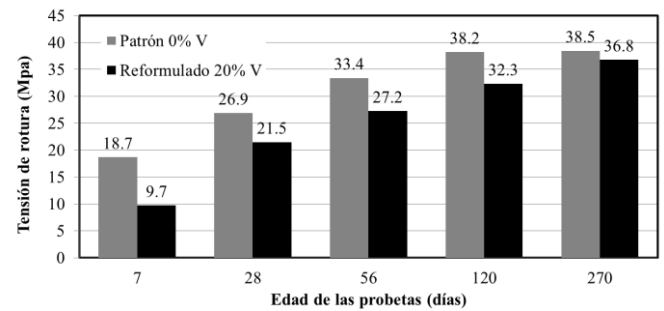


Fig. 10: Resultados de los ensayos de compresión

Puede observarse que a los 28 días el pastón patrón cumplió con el requerimiento de resistencia (establecido en 25 MPa como se indicó anteriormente) mientras que la probeta con adición de vidrio sólo alcanzó los 21,5 MPa de resistencia. A pesar de ello, es notable el incremento de resistencia a los 28 días, cuando se la compara con el resultado de ensayos a 7 días. Para la probeta patrón, el incremento fue del 44% mientras que para la probeta con adición de vidrio el incremento es del 121 %, mostrando una clara reducción en la diferencia de resistencias observada en los ensayos iniciales a 7 días del colado.

La acción del vidrio molido es evidente al considerar que la relación a/c de la mezcla es igual a 0,71 si se desprecia el vidrio como parte del cemento en la dosificación. De este modo, la resistencia a 28 días debiera ser inferior a la obtenida (18,4 MPa versus 21,5MPa), si el vidrio no hubiera contribuido activamente a mejorar la resistencia del hormigón. En efecto, si se considera el comportamiento de la resistencia con la relación a/c en el hormigón se obtiene que la mejora por incorporación de vidrio a la mezcla fue del 17%, aproximadamente, para 28 días de edad.

El comportamiento descrito se observó a medida que se fueron ensayando probetas de distinta edad, lo que se pone de manifiesto en la gráfica de la Fig. 11. Allí se ilustra el porcentaje de variación de la resistencia con la edad y puede observarse que el aumento del pastón con adición de vidrio exhibe claramente un comportamiento que mejora con el tiempo, evidenciando la influencia de este material. El aumento total de resistencia (medido entre el ensayo a 270 días y el ensayo a 7 días) es del 279 % para el hormigón con incorporación de vidrio y del 106 % para el hormigón patrón.

Este aumento significativo de la resistencia con el tiempo, experimentado por las probetas con adición de vidrio puede leerse de otra manera: la diferencia de resistencia entre la probeta patrón y la probeta con vidrio se redujo desde un 48% (para el ensayo a 7 días) a tan sólo 4,4 % (para el ensayo a 270 días).

## CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un resumen de los principales resultados de una investigación realizada en el Departamento de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) con el objeto de estudiar el comportamiento de mezclas de hormigón en las cuales se reemplaza un porcentaje del cemento por vidrio finamente molido. En estudios realizados en otros países se ha

encontrado que este tipo de mezcla da buenos resultados como consecuencia de reacciones puzolánicas que ocurren entre las micro partículas de vidrio y la cal liberada en la hidratación primaria del cemento generando compuestos  $CSH_2$  secundarios. La ausencia de este tipo de estudios en nuestro medio motivó esta investigación cuyo objetivo inicial era contrastar los resultados obtenidos por otros investigadores con ensayos propios, llevados a cabo con los materiales de nuestro medio y con la tecnología disponible en la UNC. Los estudios de resistencia se complementaron con análisis de RAS con el objeto de descartar reacciones perjudiciales provocadas por la adición de vidrio (sílice amorfa) a la mezcla.

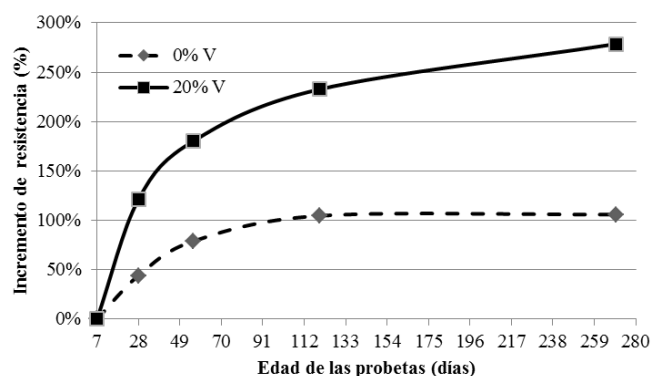


Fig. 11: Resultados de los ensayos de compresión

Los resultados de los ensayos RAS mostraron que, para granulometrías del vidrio molido menores a  $150 \mu m$ , la incorporación de este elemento tiende a inhibir la RAS y que este efecto es proporcional al porcentaje de vidrio que se incorpora. Se destaca que valores del 15% a 25% de sustitución de cemento en morteros y hormigones y una granulometría “gruesa” ( $T_{m\acute{a}x} = 150 \mu m$ ) permite concluir que el efecto es beneficioso fundamentalmente si se utilizan áridos potencialmente reactivos. Sin embargo no se ha podido establecer el porcentaje óptimo de adición o el tamaño de partícula máximo que limite la inhibición de la reacción. Se considera que es necesario ampliar el estudio para confirmar (o rechazar) la tendencia observada y debería hacerse extensiva a granulometrías superiores del vidrio molido ya que el uso de fracciones más gruesas potenciaría la aplicabilidad de estas adiciones.

Inicialmente se investigó cómo variaba la resistencia del concreto endurecido cuando se reemplaza cemento por vidrio molido en distintos porcentajes. Para ello se elaboraron probetas cilíndricas de  $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  y  $15 \times 30 \text{ cm}$  con porcentajes de reemplazo 0% (patrón de control), 15%, 20%, y 25%. Estos primeros resultados fueron presentados en [20] y en base a ello se continuó la investigación con pastones reformulados con 0% y 20% de reemplazo de cemento por vidrio molido, extendiendo la serie de probetas hasta los 270 días. Las instalaciones disponibles permitieron trabajar con vidrio molido pasante tamiz #200 (tamaño medio  $41 \mu m$ ). Esto se considera una limitación en este estudio, ya que las investigaciones consultadas durante la revisión de literatura realizada muestran buen comportamiento de estas mezclas cuando se utilizan tamaños medios inferiores a los aquí empleados (25

$\mu m$  y  $38 \mu m$ ). Esta es, quizás, una de las causas por las que en esta investigación no se pudo confirmar con precisión los resultados de otros investigadores en donde los hormigones con reemplazo de 15% y 20% de cemento por vidrio molido presentan resistencias mayores a las probetas de control, como se puede ver en [4] y [10].

Sin embargo, en esta investigación se detectó claramente la actividad de reacciones de largo plazo debido a la incorporación del vidrio como puzolana. Esto es evidente por el aumento de la resistencia en el tiempo del hormigón, como lo confirman los ensayos de probetas de hasta 270 días de edad (lo que es consistente con otras investigaciones). Las probetas patrones siempre mostraron resistencias mayores a las que se elaboraron con mezcla con vidrio, resultados que, como se indicó anteriormente, podrían deberse a la granulometría utilizada para el vidrio molido, al alto contenido de cemento de las mezclas y a las condiciones óptimas de curado utilizadas en este estudio.

En este sentido, los autores consideran que se requiere una mayor investigación y pruebas de laboratorio, trabajando con partículas más finas y con distintos contenidos de cemento, relaciones agua-cemento y condiciones de curado, para confirmar los resultados disponibles.

Como puede apreciarse, a largo plazo las probetas con incorporación de micro partículas de vidrio llegaron a incrementar su resistencia 250% en relación a la resistencia inicial a 7 días, mientras que las probetas de control (sin adición de vidrio en la mezcla) sólo incrementaron la resistencia en un 100%.

Si se desprecia la adición de vidrio como parte del cemento activo, la resistencia a 28 días debiera ser inferior a la obtenida. En efecto, si se considera la relación a/c neta (sin considerar la adición del vidrio molido) igual a 0,71 en el hormigón se obtiene que la mejora por incorporación de las micro partículas de vidrio a la mezcla fue del 17%, aproximadamente, para 28 días de edad.

Al cierre de la presentación de este artículo se están procesando los resultados de ensayos de resistencia de pastones de hormigón con reemplazo de 20% de cemento por vidrio finamente molido, en condiciones similares a las descritas anteriormente pero con dos relaciones a/c diferentes: 0,47 y 0,60 con el objeto de evaluar el impacto de esta variable en las resistencias. Los ensayos de esta segunda parte son preliminares, pero confirmarían la tendencia observada anteriormente y resumida en este trabajo.

A modo de conclusión general de este artículo se considera que los resultados parciales obtenidos son prometedores y que los beneficios socio-económicos y ambientales de su aplicación son evidentes. Se ha reportado que la incorporación de una tonelada de vidrio al hormigón permite ahorrar al menos una tonelada de recursos naturales empleados para la fabricación de cemento, a la vez que por cada seis toneladas de vidrio incorporado se reducen en una tonelada las emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera [4].

La adición de vidrio molido reciclado como reductor del contenido de cemento en el hormigón repercute positivamente en toda la sociedad, ya que logra reducir los costos de fabricación, al mismo tiempo que produce una

merma en la cantidad de recursos naturales explotados, las emisiones de gases de invernadero a la atmósfera, el consumo de energía y el volumen de rellenos sanitarios ocupado con vidrio de desecho.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por su ayuda y dedicación al Supervisor Técnico Marcelo Tissera y al personal del Laboratorio de Estructuras por su asistencia en la ejecución de los ensayos, entre los que cabe destacar especialmente a la Inga. Irico y los becarios Julia Cruz Doblás y Fernando Weht. También se agradece especialmente a las autoridades de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC y al Departamento de Estructuras por autorizar el desarrollo este proyecto de investigación. Al Dr. Aldo Bonalumi por facilitar las petrografías y análisis granulométricos. A la Dra. Rosa Ayala y a Maximiliano Medina por realizar los cortes delgados y las micrografías. Se desea destacar también el aporte del Ing. Jorge Pagliero y Hormi-Block S.A, al Ing. Raúl López y Franco Fistarol, quienes facilitaron los materiales para esta investigación. Finalmente, se agradece a Sergio Murúa de Fénix Reciclados S.R.L y a Pratto Reciclados, quienes aportaron importantes datos acerca del reciclado del vidrio en Córdoba.

## REFERENCIAS

- [1] Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, [Online]. <http://www.ambiente.gov.ar/observatorioursu/grupo.asp>. [Accessed 24 abril 2014].
- [2] Comisión Elaboración Pliego para Concesión Servicio Público de Higiene Urbana, "Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de Córdoba," 2012.
- [3] "Se recupera sólo el 1% de lo reciclable," Artículo publicado en el periódico La Voz del Interior, Córdoba, 6 mayo 2013.
- [4] Roz-Ud-Din Nassar and P. Soroushian, "Field investigation of concrete incorporating milled waste glass," *Journal of Solid Waste Technology and Management*, vol. 37, no. 4, pp. 307-319, 2011.
- [5] J. Caló, "La Cadena de Valor del Reciclado de Residuos Sólidos Urbanos. La dinámica socio-técnica de los procesos de reciclado en las cooperativas de recuperadores urbanos surgidas a partir de los cambios económicos, sociales y tecnológicos de la crisis del 2001", Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Universidad Nacional de Quilmes. Instituto de Estudios Sobre la Ciencia, Octubre de 2009.
- [6] J. M. Fernández Navarro, *El Vidrio*, Tercera ed., Madrid: ARTEGRAF S.A., 2003. ISBN: 84-00-08158-7
- [7] Mónica A. Villaquirán, Ruby M. de Gutiérrez, "Nuevo Cemento de Activación Alcalina Basado en Metacaolín" *International Conference on Sustainable Structural Concrete*, ISBN 978-987-3838-02-6, pp. 120 – 129, 15 – 18 de Septiembre de 2015, La Plata, Argentina.
- [8] Gemma P. Rodríguez de Sensale, Iliana Rodríguez Viacava, Daniel Godoy "Cemento Portland Compuesto con Ceniza de Cáscara de Arroz" *International Conference on Sustainable Structural Concrete*, ISBN 978-987-3838-02-6, pp. 169 – 180, 15 – 18 de Septiembre de 2015, La Plata, Argentina.
- [9] Lesday Martínez Fernández, Rafael Quintana Puchol, José Fernando Martirena Hernández "Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar" *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 22 N°2, PAG. 113-122. Agosto de 2007.
- [10] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras and D. Rodríguez, "Studies on concrete containing ground waste glass," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 91-100, 2000.
- [11] B. Taha and G. Nounu, "Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement" *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 713-720, 2008.
- [12] A. Shayan and A. Xu, "Value-added utilisation of waste glass in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 81-89, 2004.
- [13] Rosemary B. C. Sales; Fernando A. Sales; Nelcy D. S. Mohallem; Patrícia S. O. Patrício; Maria Teresa P. Aguilar. "Avaliação do desempenho de micropartículas de vidro soda cal como material cimentício suplementar". XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Montevideo, Uruguay. 19 a 21 de Noviembre de 2014.
- [14] Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, "Datos estadísticos - Informe Mensual," Enero 2014.
- [15] U.S. Geological Survey, "Mineral Commodity Summaries," Febrero 2014.
- [16] E. e. a. Worrell, "Carbon dioxide emissions from the global cement industry". *Annual Review of Energy and the Environment*, Volume 26, pp. 303-329, 2001.
- [17] W. F. Smith, *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Tercera ed., Madrid: McGraw Hill, 1998. ISBN: 84-481-1429-9.
- [18] W. Jin, PhD Thesis: Alkali-silica Reaction in Concrete with Glass Aggregate: A Chemo-physico-mechanical Approach., Columbia University, USA., 1998.
- [19] R. K. Dhir, T. D. Dyer and M. C. Tang, "Expansion due to alkali-silica reaction (ASR) of glass cullet used in concrete.," *Recycling and reuse of waste materials*, pp. 751-761, September 2003.
- [20] J. Cruz Doblás, M. Rodríguez, F. Weht, M. Ruiz, P. Irico, "Diseño de un hormigón con incorporación de vidrio de desecho", *International Conference on Sustainable Structural Concrete*, ISBN 978-987-3838-02-6, pp. 192 – 203, 15 – 18 de Septiembre de 2015, La Plata, Argentina.