

DISEÑO DE UN HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE VIDRIO DE DESECHO

J. Cruz Doblas⁽¹⁾, M. Rodríguez⁽²⁾, F. Weht⁽¹⁾, M. Ruiz⁽¹⁾, P. Irico⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

⁽²⁾ Rodar – Empresa Constructora, Córdoba, Argentina

Número ID del Resumen (asignado por la Organización): #202

Palabras Clave: Hormigón; Cemento; Vidrio de desecho; Reciclado.

Contacto de Autores

Autores	E-Mail	Fax	Dirección postal
Cruz Doblas, Julia	juliacruzdoblas@gmail.com	-	Casilla de Correo 916, Correo Central, Córdoba 5000, Argentina. Departamento de Estructuras, Edificio de Ingeniería, Ciudad Universitaria
Rodríguez, Matías	matiasrod10@yahoo.com.ar	-	
Weht, Fernando	fernando.d.weht@gmail.com	-	
Ruiz, Miguel	mrui@efn.uncor.edu	-	
Irico, Patricia	pairico@hotmail.com	-	

Persona de contacto para el trabajo: Julia Cruz Doblas

Presentador durante la Conferencia: Matías Rodríguez

Número total de páginas del trabajo (excluyendo las primeras páginas y la licencia para publicación): 12

DISEÑO DE UN HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE VIDRIO DE DESECHO

(DESIGN OF CONCRETE INCORPORATING WASTE GLASS)

J. Cruz Doblas⁽¹⁾, M. Rodríguez⁽²⁾, F. Weht⁽¹⁾, M. Ruiz⁽¹⁾, P. Irico^{(1)*}.

⁽¹⁾ Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

⁽²⁾ Rodar – Empresa Constructora, Córdoba, Argentina

* Autor correspondiente: pairico@hotmail.com; leestructuras.dir@efn.uncor.edu

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 pero reduce la resistencia de la mezcla, para las tres proporciones evaluadas, en comparación con mezclas sin vidrio. Sin embargo, se encontró que el vidrio inhibe significativamente la reacción álcali sílice, aún cuando se utilizan áridos reactivos.

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 but reduces the resistance of the concrete, compared with mixtures without glass, at least for the size of the particles used in this investigation. However, glass was found to significantly inhibit the alkali-silica reaction, even when reagents aggregate are used.

1. 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 recupera 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].

Al vidrio reciclado que se encuentra limpio y triturado se lo comercializa bajo la denominación de calcín, material que se incorpora hasta en un 10% como materia prima en la fabricación de envases y vajilla nueva [5]. Sin embargo, el empleo de calcín trae consigo el riesgo de incrementar algunos defectos del vidrio, debido fundamentalmente a las impurezas metálicas que puede introducir en las nuevas mezclas [6]. Además, debe considerarse el costo por el 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 posibilidad 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. En [4] se utilizan micropartículas de vidrio de 25 μm 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 [16] los autores estudian mezclas con partículas de 38 μm , 75 μm y 150 μm y obtienen resultados similares a los de [4] para el reemplazo de 30% de cemento usando partículas de 38 μm . Los estudios [12] y [17] 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 [10] se evalúa la actividad puzolánica de las micropartículas a través de ensayos de termogravimetría, conductividad eléctrica, Chapelle 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 Álcali-sílice. Por último, [13] y [14] concluyen que el vidrio molido

agregado al hormigón, en proporciones adecuadas, se comporta como un material puzolánico, brindándole al hormigón reacciones cementicias secundarias beneficiosas.

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 [7]. A nivel mundial se producen alrededor de 4.000 millones de toneladas de cemento anuales [8].

La reducción en el consumo de cemento disminuiría la producción industrial del clínker, principal componente del cemento portland. Este proceso genera altas cantidades de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2), óxidos como SO_x , NO_x y partículas volantes. Se estima que para producir una tonelada de cemento se libera a la atmósfera una tonelada de CO_2 . A nivel mundial del 5 al 8% del CO_2 emanado por la actividad industrial es debido a la producción del cemento [9]. De este modo, la reducción de producción de clínker 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.

2. 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. Estos estudios se llevaron a cabo para 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.

2.1. Tipo de vidrio a utilizar

Como es conocido, existe una amplia gama de vidrios con distintas características y componentes. Sin embargo, 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, por lo que se adoptó ésta tipología para desarrollar el presente estudio. Esta decisión es consistente con trabajos previos, que prueban el comportamiento puzolánico de este tipo de vidrio [4], [10] e indican que la fabricación de los vidrios soda-cálcicos constituye alrededor del 90% de todo el vidrio producido [14].

2.2. Material utilizado

El vidrio soda cálcico o Tipo A es el vidrio comercial más común y el menos costoso. Sus componentes principales son: óxido de silicio (SiO_2 71-73%), óxido de sodio (Na_2O 12-14%) y óxido de calcio (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 (Fe_2O_3), el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el óxido de cromo (Cr_2O_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).

Con el objeto de alcanzar una buena representación del material que normalmente se encuentra entre los vidrios de desecho, 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 ámbar. Estas proporciones se mantuvieron a lo largo de todo el estudio.

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.

2.3. Granulometría del vidrio molido mezcla y porcentajes de adición.

En [16], 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 Figura 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 tamaño medio $41\ \mu\text{m}$) 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 encuentren, se decidió utilizar para la elaboración de las probetas para estudiar la resistencia de la mezcla la fracción P#200 del vidrio molido.

Cabe destacar que estudios más rigurosos hallados utilizan tamaños medios de $9\ \mu\text{m}$ a $25\ \mu\text{m}$ [4] [10], 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].

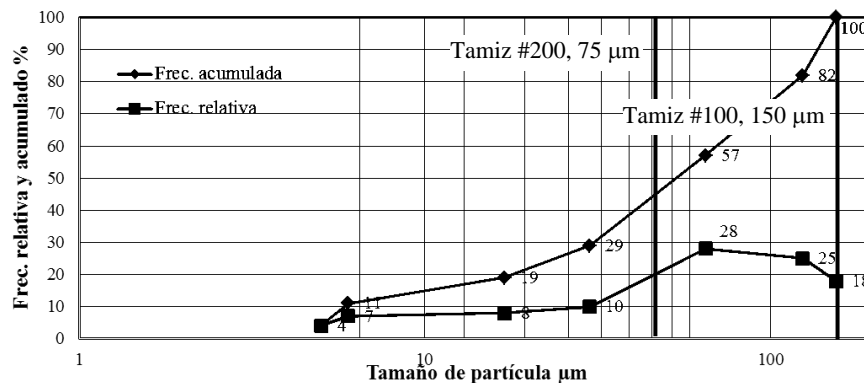


Figura 1. Distribución granulométrica del vidrio molido P#100.

2.4. 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 definitivo 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). Las distintas proporciones de vidrio utilizado y demás características de los distintos componentes de las mezclas de mortero se exponen en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos de reactividad alcalina potencial por el Método de la Barra de Mortero.

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

2.5. Evaluación de la resistencia del hormigón con reemplazo parcial de cemento por vidrio molido

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), 15%, 20% y 25%. Estos valores implican una reducción de igual proporción en el contenido de cemento, por lo que se mantuvieron fijas las cantidades del resto de los elementos intervinientes de la mezcla; se asumió que el vidrio forma parte del material aglomerante (cemento). En una segunda etapa se elaboraron pastones con una mayor relación agua/cemento conteniendo 0 y 20% de vidrio pasante malla #200, a los que se denominó “reformulados”. Las dosificaciones para 1 m³ 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 y 120 días según norma IRAM 1546, utilizando una prensa Ibertest HIB 150.

Tabla 2. Dosificación de pastones y propiedades en estado fresco

Denominación	0% V	15% V	20% V	25% V	Reformulado 0% V	Reformulado 20% V
Cemento (kg)	371	316	297	279	371	297
Vidrio mezcla P#200 (kg)	-	56	74	93	-	74
Agregado Grueso (kg)	1023	1023	1023	1023	1023	1023
Agregado Fino (kg)	834	834	834	834	834	834
Agua (kg)	202	202	202	202	211	211
Relación a/c	0,54	0,54	0,54	0,54	0,57	0,57
Densidad (kg/m³)	2,34	2,33	2,33	2,28	2,29	2,27
Asentamiento (cm)	3,5	4,0	4,0	4,5	4,0	4,5
Plasticidad	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Buena	Muy buena	Muy buena

Denominación	Patrón 0% V	Reformulado 20% V
Cemento (kg)	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 ³)	2,29	2,27
Asentamiento (cm)	4,0	4,5
Plasticidad	Muy buena	Muy buena

3.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. 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 **Figura 2**, Figura 3 **Error! Reference source not found.** y Figura 4, en las que puede apreciarse claramente el efecto inhibitor de la RAS que generan las micro partículas de vidrio. Si se observa la **Figura 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 Figura 3 **Error! Reference source not found.** **Error! Reference source not found.** 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.

Finalmente, la Figura 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.

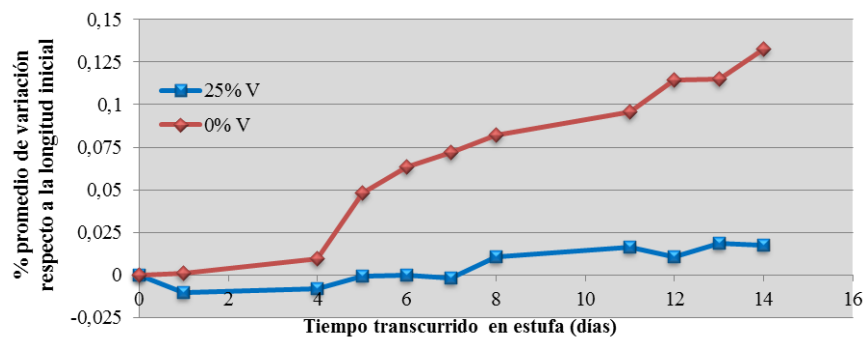


Figura 2. Expansión de las barras elaboradas con Mortero I.

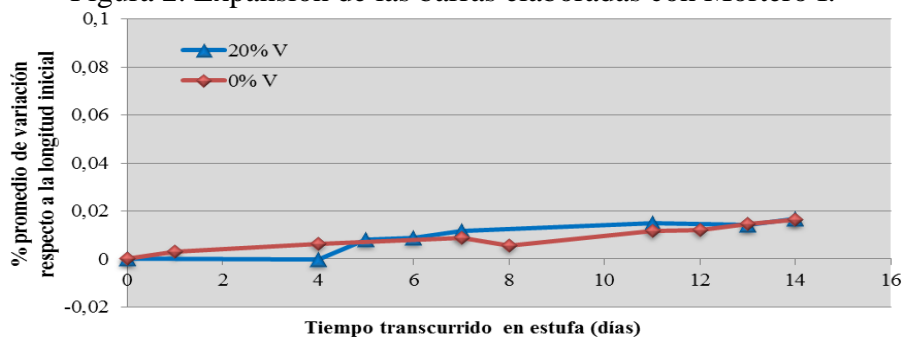


Figura 3. Expansión de las barras elaboradas con Mortero II.

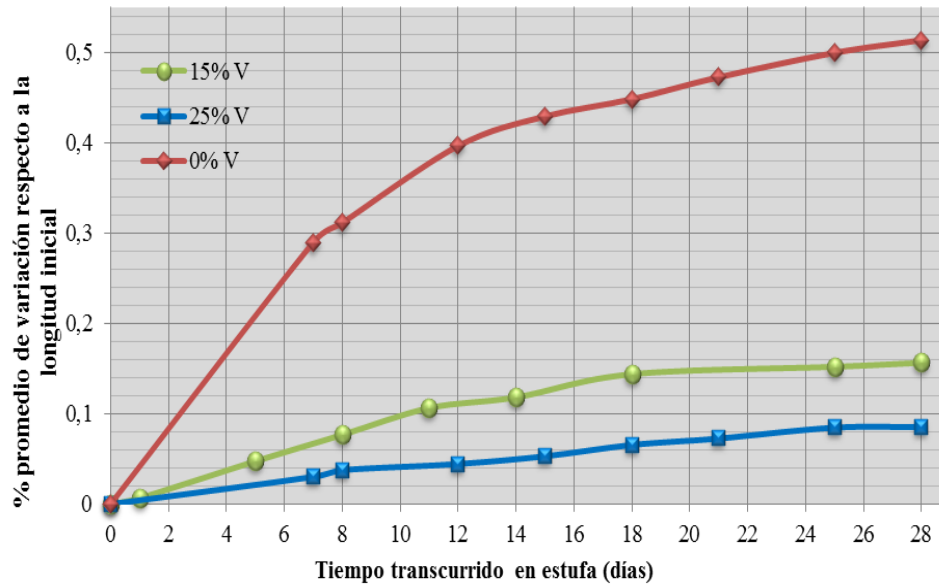


Figura 4. Expansión de las barras elaboradas con Mortero III.

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 Figura 5 a Figura 8. La Figura 5 y Figura 6 corresponden a la probeta con 0%V que mostraron 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 7 correspondiente a la probeta con 25%V y la Figura 8 propia de la probeta con 15%V 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.

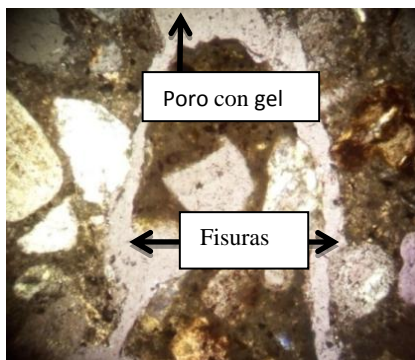


Figura 5. Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III sin adición de vidrio.

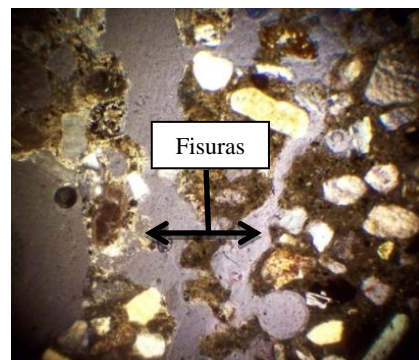


Figura 6. Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III sin agregado de vidrio.

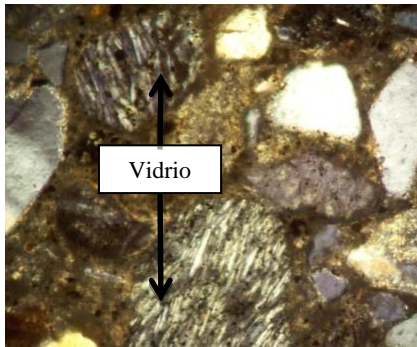


Figura 7. Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III con 25% de adición de vidrio.

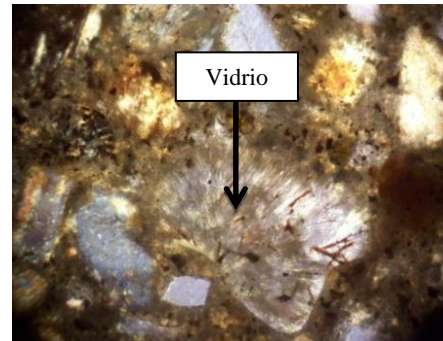


Figura 8. Micrografía del corte transversal de la barra de Mortero III con 15% de adición de vidrio.

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

En la Figura 9 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de los distintos pastones elaborados, según las edades de rotura de las probetas.

Puede observarse que a los 28 días la mayoría de las probetas cumplieron con el requerimiento de resistencia, excepto el de 25% V y el reformulado de 20% V, que lo consiguen a los 56 días. Como era de esperarse, se produce una merma en la resistencia inicial de los pastones reformulados debido a la mayor relación a/c, sin embargo el pastón reformulado con 20% de vidrio presenta a 120 días una resistencia superior a todas las formulaciones con adición de vidrio molido, lo que indicaría que se produjeron reacciones secundarias propias de los compuestos puzolánicos.

Este comportamiento se observa en la tasa de crecimiento graficada en la Figura 10. A 120 días la mayoría de las formulaciones incrementaron su resistencia inicial de 7 días en un 100%, las que se alejan de esta tendencia son la mezcla con 15% V que aumenta en un 82% su resistencia inicial y la mezcla reformulada de 20% V que incrementó su resistencia en un 244%.

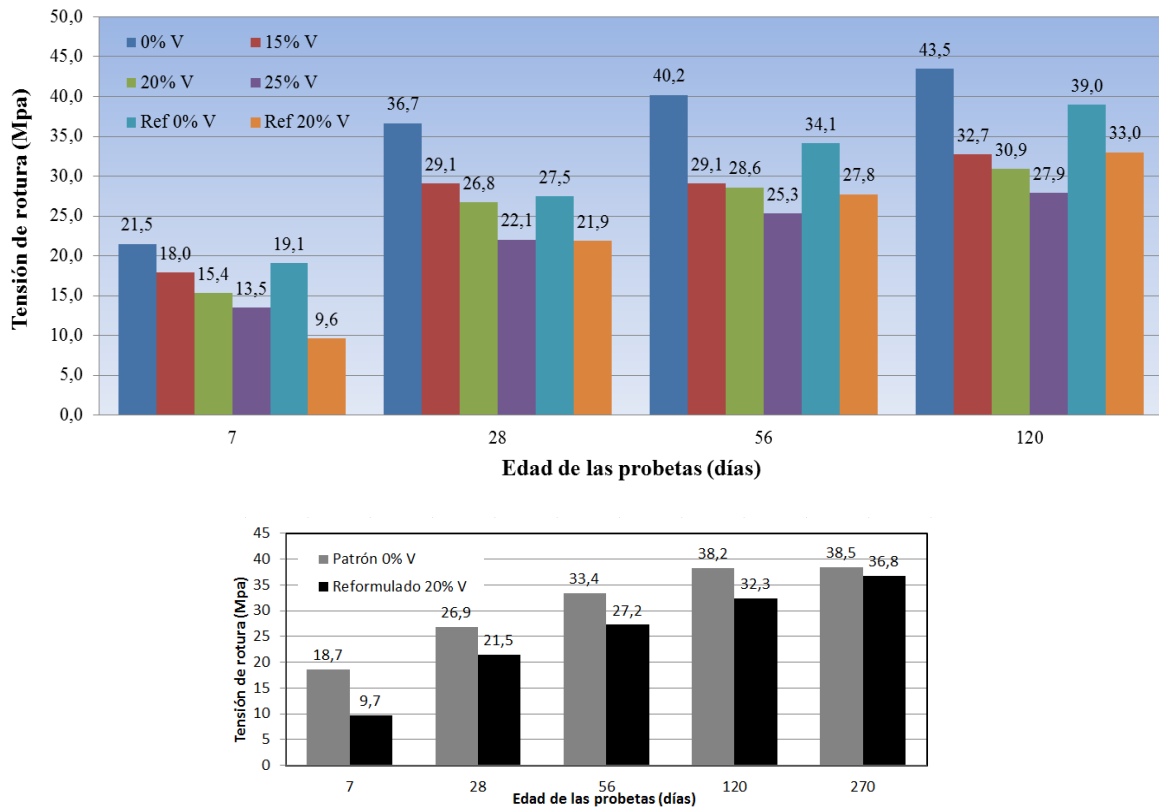


Figura 9. Resistencia media de probetas correspondientes a las distintas edades de rotura

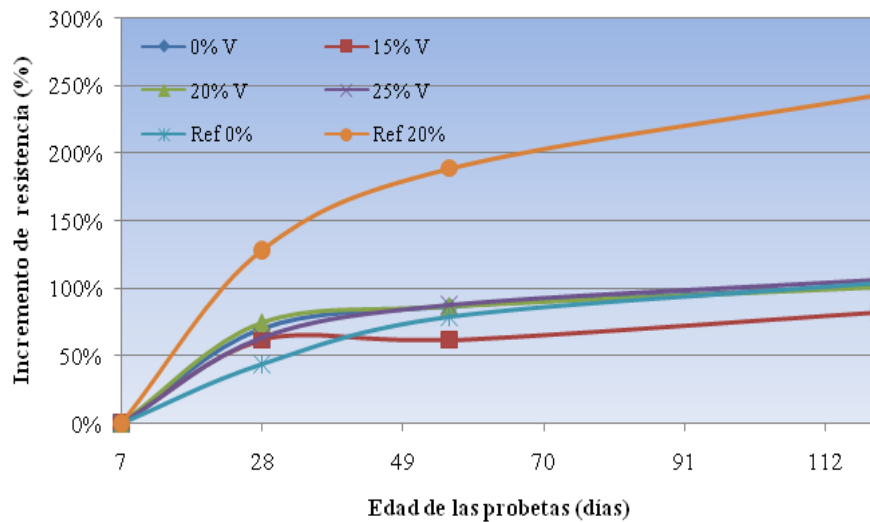


Figura 10. Incremento de resistencia respecto a la inicial para las distintas formulaciones

4. 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 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 del tipo CSH secundarias o puzolánicas que ocurren entre las micro partículas de vidrio y la cal liberada en la hidratación primaria del cemento. La ausencia de este tipo de estudios en nuestro medio motivó esta investigación. Los estudios de resistencia se complementaron con análisis de Reacción Álcali-Sílice (RAS) con el objeto de descartar reacciones perjudiciales provocadas por la adición de vidrio (sílice amorfa) a la mezcla. Los resultados de los ensayos RAS mostraron que, para granulometrías del vidrio molido menores a 150 μm , 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” ($T_{\text{max}} = 150 \mu\text{m}$) 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.

Además, en este estudio 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 cm x 20 cm y 15 x 30 cm con porcentajes de reemplazo 0% (patrón de control), 15%, 20%, y 25%. Las instalaciones disponibles permitieron trabajar con vidrio molido pasante tamiz #200 (tamaño medio 41 μm). Esto se considera una limitación en este estudio, ya que las investigaciones consultadas que muestran buen comportamiento de estas mezclas utilizan tamaños medios inferiores a los aquí empleados. Esta es, quizás, una de las causas por las que en esta investigación no se pudo confirmar 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 [16].

Sin embargo, en esta investigación se detectó claramente la actividad de reacciones puzolánicas puestas en evidencia por el aumento de la resistencia en el tiempo del hormigón, como lo confirman los ensayos de probetas de hasta 120 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, y condiciones de curado, para confirmar los resultados disponibles.

Es de notar que, cuando la relación agua cemento se incrementó dando origen al pastón “reformulado”, las probetas de control y con 20% de sustitución de cemento por vidrio molido sufrieron una merma en la resistencia inicial, acorde a la conocida Ley de Abrams. Este comportamiento se mantiene para todas las edades de probetas patrón. Sin embargo, puede observarse que el pastón reformulado que contiene 20% de vidrio arrojó una resistencia mayor a la del pastón original para una edad de 120 días, a pesar de tener una relación a/c mayor. Este resultado no coincide con el comportamiento habitual de las puzolanas por el cual se reduce su efecto al incrementar la relación a/c. Esta situación motivó la realización de un nuevo conjunto de probetas de similares características pero con hormigones de distinta

relación a/c con el objeto de verificar o rechazar este resultado. Esta segunda parte de la investigación se encuentra en curso al momento de la presentación de este artículo.

Como puede apreciarse, a largo plazo las probetas con incorporación de micro partículas de vidrio llegaron a incrementar su resistencia en un 250% la resistencia inicial a 7 días.

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 CO₂ 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. 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, 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/observatoriorsu/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] Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, "Datos estadísticos - Informe Mensual," Enero 2014.
- [8] U.S. Geological Survey, "Mineral Commodity Summaries," Febrero 2014.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Varios, Ese material llamado Hormigón, Buenos Aires: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2012.
- [12] 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.
- [13] Kosmatka et al., Diseño y control de mezclas de concreto. Boletín de Ingeniería EB201, Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- [14] W. F. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Tercera ed., Madrid: McGraw Hill, 1998. ISBN: 84-481-1429-9.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] A. Shayan and A. Xu, "Value-added utilisation of waste glass in concrete," Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 81-89, 2004.