



CUARTO CONGRESO INTERNACIONAL
CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO
DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

HORMIGONES RECICLADOS: UNA ALTERNATIVA PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario
para la Investigación Tecnológica (LEMIT)

HORMIGONES RECICLADOS: UNA ALTERNATIVA PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

C. J. Zega, M. E. Sosa, A. A. Di Maio

Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT)
hormigones@lemit.gov.ar

RESUMEN

La presencia de infraestructuras ha sido un indicador de la calidad de vida de cualquier sociedad moderna, aunque en raras ocasiones se ha tenido en cuenta el impacto generado. Por otra parte, las estructuras y elementos desechados por algunas civilizaciones han sido aprovechados por civilizaciones venideras para la construcción de nuevas estructuras. En el caso de la industria de la construcción, esta siempre ha sido considerada como generadora de gran cantidad de residuos, al mismo tiempo que posee una larga tradición en su reutilización, tanto de desperdicios propios como de otras industrias. La escasez de recursos naturales, las necesidades crecientes de materia prima y fundamentalmente la preservación del medio ambiente ha llevado a la búsqueda de nuevas opciones para el reciclado de materiales en el campo de la Ingeniería Civil; una de las que presenta mayores expectativas de desarrollo es la relacionada con la reutilización de los hormigones de desecho como agregados reciclados en la producción de nuevos hormigones. La línea de investigación que se lleva adelante en el LEMIT, desde hace casi veinte años, vinculada a la temática de los hormigones reciclados, busca incrementar los conocimientos sobre el desempeño mecánico y fundamentalmente durable de este nuevo material, con fin de lograr el mayor porcentaje de utilización del residuo sin desmerecer la calidad del hormigón reciclado, contribuyendo de este modo al desarrollo sustentable del hormigón.

Palabras clave: hormigón, agregado reciclado, sustentabilidad, resistencia, durabilidad.

INTRODUCCIÓN

Durante miles de años, las mejoras en la calidad de vida han sido el indicador de cualquier sociedad desarrollada. Este indicador ha estado siempre asociado a la presencia de infraestructuras que facilitan el desarrollo de las actividades diarias, pero casi nunca se ha tenido en cuenta el impacto que estas pueden provocar.

La historia muestra que la sociedad ha considerado como una práctica habitual la recuperación y uso de muchos elementos desechados. Numerosas civilizaciones han utilizado y reutilizado diversos materiales de civilizaciones anteriores o de sus propias obras destruidas, para realizar nuevas construcciones. Los restos romanos fueron aprovechados sistemáticamente por los romanos y los árabes. Los restos de las iglesias románicas en mal estado fueron las suministradoras de materiales de construcción de numerosas masías. Recordemos que la pedrera de fuero romano fue utilizada para la construcción de la basílica renacentista del Vaticano. La Alemania de la posguerra muchas veces aprovechó los materiales de demolición que habían quedado, para utilizarlos en las nuevas construcciones.

Sin embargo, la evolución de los medios de transporte, el gran desarrollo de los medios de elevación y sobre todo la tendencia consumidora de nuestra sociedad reciente han conseguido que este componente importante de la construcción haya cambiado. *Todo debe ser nuevo y lo viejo debe ser tirado*. Pero la consecuencia más directa de esta forma de “evolución” ha sido que el incremento de los residuos se fuera constituyendo en un gran problema, fundamentalmente de tipo ambiental. Este hecho ha llevado a la necesidad de realizar un replanteo sobre dicha situación y buscar prácticas más sustentables.

Por otro lado, la propia industria de la construcción siempre ha sido considerada como generadora de una gran cantidad de residuos, al mismo tiempo que posee una larga tradición en cuanto a la capacidad de reutilizar no solamente sus propios residuos sino también los generados por otras industrias. Esta capacidad de recuperación es precisamente lo que es necesario promover en nuestra sociedad.

Factores como la escasez de recursos naturales, las necesidades crecientes de materia prima y fundamentalmente la preservación del medio ambiente, con la consecuente necesidad de disposición de los residuos, han llevado a la búsqueda de nuevas opciones para el reciclado de materiales de desecho en el campo de la Ingeniería Civil. Así es que desde hace más de cincuenta años se ha comenzado con los estudios sobre el reciclaje de materiales de desecho de la construcción a fin de determinar su comportamiento resistente y durable, ya que su empleo se había limitado generalmente a elementos carentes de solicitaciones resistentes importantes.

En el mercado actual de consumo, se observa la presión de los ecologistas y una creciente concientización de la población respecto a la necesidad de reciclar los materiales que han cumplido su vida útil. Esta política presenta grandes atractivos frente a la utilización de materias primas naturales, cuyas ventajas más destacadas son que se soluciona al mismo tiempo la problemática originada en la eliminación de subproductos de desecho y que mediante el uso de estos residuos se obtiene una nueva materia prima, que en el caso de los

hormigones son los agregados, lo que reduce de esta forma una cantidad considerable de recursos naturales primarios a extraer.

El uso de hormigón triturado como agregado, conocido habitualmente como “agregado reciclado”, para la elaboración de nuevos hormigones aparece como una alternativa importante, particularmente en regiones densamente pobladas o con escasos recursos naturales. El reciclado de materiales de construcción, impensable hasta hace algunos años, es hoy en día una de las actividades con mayores perspectivas de crecimiento.

Aunque diversos estudios han demostrado la factibilidad del empleo de agregados reciclados, en la mayoría de los casos su aplicación fue orientada, como ya ha sido mencionado, para la elaboración de hormigones de baja calidad. Tal es así que la mayoría de los investigadores coinciden en que los agregados reciclados pueden utilizarse sin mayores precauciones en aquellos casos que no existan demandas de grandes niveles de resistencia (fundaciones, estructuras con cargas menores, etc.).

Sin embargo, un mayor conocimiento de sus propiedades hará que su uso se generalice, dando lugar a hormigones reciclados con niveles de resistencia, durabilidad, etc., similares a los exigidos para los hormigones elaborados con agregados naturales.

Los hormigones elaborados con agregados reciclados serán preferidos en algunas de las siguientes situaciones: a) cuando existan normativas que permitan su evaluación y control, b) cuando haya escasez de agregados naturales o bien c) cuando surjan leyes que prohíban la disposición de materiales de desecho en cualquier sitio. Asimismo, la simultaneidad de estos tres ítems llevará al uso irremediable de los agregados reciclados. En tal sentido, desde el año 2016 se encuentra vigente en nuestro país la modificación a la Norma IRAM 1531, que permite la evaluación de los agregados gruesos reciclados que vayan a ser empleados en la elaboración de hormigones estructurales, admitiendo un contenido máximo del 20 % del agregado grueso total. Por otra parte, algunos municipios de la provincia de Buenos Aires poseen ordenanzas que prohíben la apertura de nuevas canteras y la explotación de otras ya existentes. Respecto al tercer punto enunciado anteriormente, aún no existen leyes que prohíban y castiguen el vertido indiscriminado de los residuos.

Reciclado de hormigones

En el caso del reciclaje de hormigones, el proceso de tratamiento consiste básicamente en las operaciones de *preclasificación*, *trituración* y *clasificación final del producto*; de esta forma se tiende a la obtención de un producto final similar a los agregados que se comercializan. Las plantas de producción de agregados reciclados son similares a las de producción de agregados primarios. El nivel de complejidad de la planta lo define el grado de contaminación y la aplicación del material.

Las características de un agregado natural dependen en primera instancia de las características de la roca madre, mientras que las del agregado reciclado dependerán de las

características de la roca, pero también del mortero del hormigón original, siendo importante las cantidades relativas en que se presentan cada uno de ellos.

El agregado, producto de la trituración de hormigones, puede presentar cualquiera de las siguientes características:



Estas características del agregado reciclado hacen que sea un material heterogéneo, constituido por dos fases: mortero y roca, que poseen propiedades diferentes; la porosidad del mortero es la más importante, ya que modifica otras propiedades como la densidad, absorción de agua, resistencia, dureza, durabilidad, etc.

La presencia del mortero que queda adherido a los agregados del hormigón original produce en los agregados reciclados una textura más rugosa y porosa que la del agregado natural. La porosidad que posee principalmente el mortero hace que los agregados reciclados puedan absorber parte del agua de mezclado en aquellos casos en que se los utilice en estado seco, hecho que está en función directa con el porcentaje en que se los emplee. Por tal motivo, para obtener una determinada trabajabilidad prefijada del hormigón existen distintas alternativas para considerar:

- ✓ Cuantificar la cantidad de agua adicional que se debe agregar al hormigón durante el mezclado mediante ensayos previos.
- ✓ Utilizar el agregado reciclado en estado saturado.
- ✓ Utilizar una mayor dosis de aditivo fluidificante para elaborar el hormigón.

Estudios realizados en el LEMIT

Con relación a los estudios realizados y en ejecución, debe indicarse que los objetivos fundamentales tienden a:

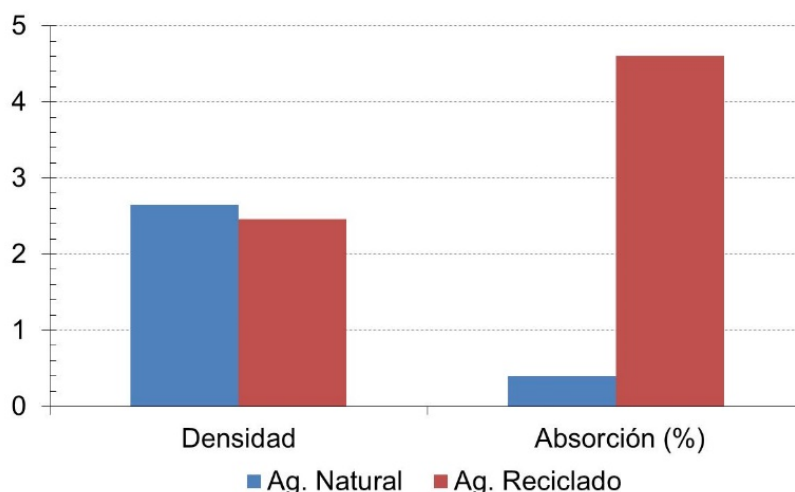
- Conocer las propiedades físico-mecánicas de los agregados obtenidos de la trituración de hormigones conocidos y de otros cuya calidad y origen se desconocen.

- Evaluar el comportamiento en estado fresco de hormigones elaborados con diferentes porcentajes y tipos de agregados gruesos reciclados, como así también determinar sus propiedades resistentes y durables en estado endurecido.

Agregados gruesos reciclados (AGR)

Considerando las características mencionadas que poseen los agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones de desecho de características tecnológicas desconocidas, debe indicarse que estos presentan una elevada absorción de agua y una baja densidad. A modo de ejemplo, puede mencionarse que en el caso de agregados gruesos reciclados provenientes de hormigones que habían sido elaborados con piedra partida granítica, estos poseían una absorción de agua promedio de 4,6 % y la densidad alcanzó valores de 2,46, mientras que el agregado natural poseían una absorción de 0,4 % y una densidad de 2,65 (figura 1) (Zega, 2008). Esta mayor absorción de agua y menor densidad de los agregados reciclados están directamente relacionadas con la cantidad de mortero adherido o suelto que poseen estos agregados luego de la trituración. Estas dos características de los agregados gruesos reciclados son las que tienen mayor incidencia al momento de ejecutar los hormigones reciclados.

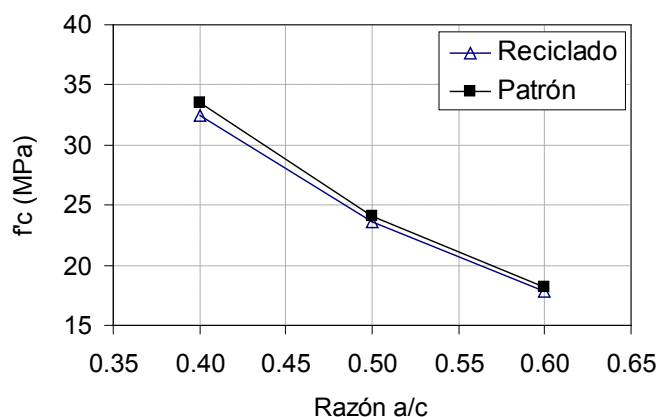
Figura 1. Densidad y absorción de agregados gruesos natural y reciclado



Resistencia y módulo de elasticidad estático

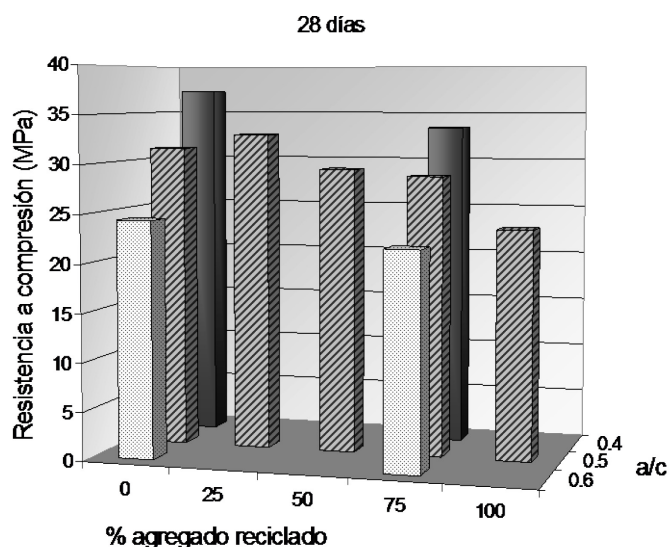
Considerando que la resistencia a compresión del hormigón es una de las características que mejor lo representa, puede indicarse que los hormigones reciclados presentan un comportamiento similar al de los hormigones convencionales elaborados con el mismo tipo de agregado grueso. Este hecho puede observarse en la figura 2.

Figura 2. Relación entre la resistencia a compresión (f_c) y la razón agua-cemento



En la figura 3 pueden observarse los valores de resistencia a compresión obtenidos en hormigones convencionales y reciclados, en los cuales se utilizaron diferentes porcentajes de agregados gruesos reciclados en reemplazo del agregado grueso natural (Di Maio *et al.*, 2002).

Figura 3. Resistencias a compresión determinadas en hormigones convencionales y reciclados



Puede observarse que, por ejemplo, para la razón agua-cemento (a/c) 0,50, la resistencia a compresión de los hormigones reciclados con un 25 % de agregado grueso reciclado fue superior a la del hormigón convencional. Para porcentajes de reemplazo de hasta un 75 %, las resistencias fueron prácticamente similares; y se produjo una caída del 20 % cuando se reemplazó el 100 % del agregado.

Con relación al módulo de elasticidad estático, parámetro de importancia para el cálculo estructural, debe indicarse que al evaluar hormigones reciclados de diferentes razones agua-cemento y para distintos porcentajes de reemplazo, el módulo obtenido fue inferior al de los hormigones convencionales, hecho que debe ser atribuido a la existencia del mortero que poseen los agregados reciclados, el cual tiene un módulo de elasticidad menor que el de la

roca. Este hecho se hace más notorio a medida que se utiliza mayor cantidad de agregado grueso reciclado.

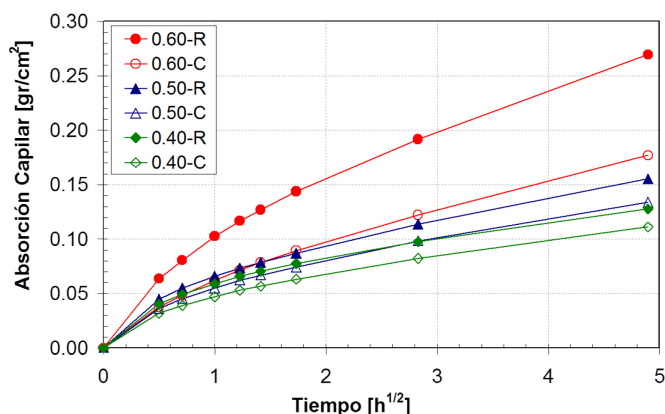
Durabilidad

Con relación a las diferentes variables que intervienen en la durabilidad de los hormigones y dada su importancia respecto a la vida útil de las estructuras de hormigón armado, debe resaltarse que en las investigaciones que se vienen desarrollando en el LEMIT se está profundizando sobre dicha temática, la cual puede ser considerada como relevante a nivel internacional ya que existe muy poca información al respecto.

Es conocido que la porosidad y la permeabilidad son propiedades fundamentales del hormigón que condicionan su durabilidad. Por tal motivo, los principales estudios se relacionan con los mecanismos de transporte, dada la mayor porosidad que poseen los hormigones reciclados (HR). Con tal propósito, se están realizando estudios relacionados con la succión capilar, penetración de agua a presión, congelación y deshielo, efecto de suelos con sulfatos, difusión de cloruros y exposición a altas temperaturas.

La evaluación de la absorción capilar se realizó sobre hormigones convencionales y reciclados de tres razones a/c bien diferenciadas (0,40; 0,50 y 0,60). Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4, donde se puede observar que al disminuir la razón a/c de los hormigones, las diferencias entre el convencional y reciclado disminuyen.

Figura 4. Absorción capilar de hormigones convencionales y reciclados



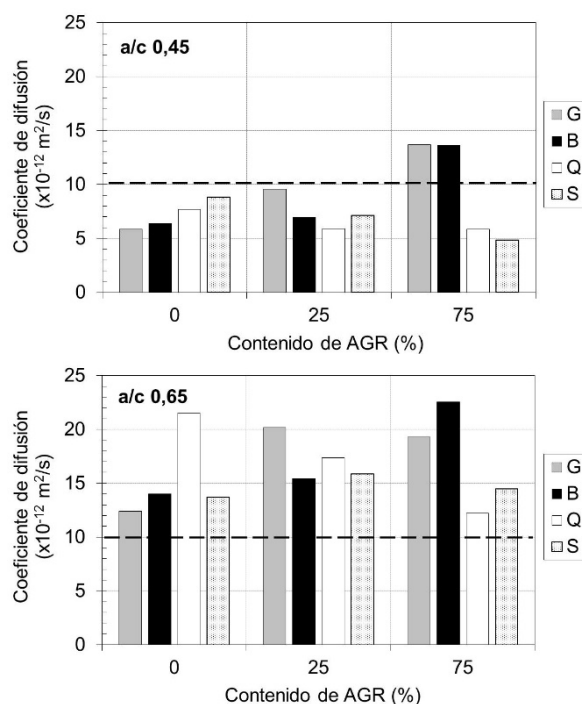
Con relación al comportamiento de los HR frente al ingreso de cloruros y su capacidad de retención, se realizaron estudios en los cuales los hormigones fueron expuestos tanto a ambientes marinos naturales como así también inmersos en una solución de NaCl 30g/l. Para ello se elaboraron hormigones de relación a/c 0,35, con aire intencionalmente incorporado y con 50, 75 y 100 % de AGR, los que fueron evaluados comparativamente con hormigones convencionales de similares características. La determinación de la profundidad de penetración de cloruros se realizó en forma periódica a los 6, 12 y 30 meses de exposición

(Villagrán-Zaccardiet *al.* 2016). Las determinaciones realizadas a los 6 y 12 meses en las muestras de los hormigones reciclados en estudio inmersas en la solución de NaCl presentan similar comportamiento que los hormigones convencionales. Si bien los agregados reciclados poseen una porosidad mucho más importante que los agregados naturales, este hecho no modificó el comportamiento de los hormigones con ellos elaborados dado fundamentalmente a que la matriz del nuevo hormigón (razón a/c 0,35) presentó una alta compacidad, originando un decrecimiento de la porosidad y una importante mejora de la calidad de la zona de interfaz.

En el caso de las muestras expuestas en ambiente natural marino, las mismas se ven afectadas por las variaciones en el contenido de humedad del ambiente. Los mecanismos de absorción capilar del agua de lluvia que podrían tomar cloruro en el hormigón disminuyen significativamente con la estructura de poros originada por la inclusión de aire. Las burbujas de aire se convierten en poros esféricos dentro del hormigón endurecido y disipan la tensión superficial y limitan la profundidad del frente de penetración por absorción capilar. Este hecho contribuye a reducir la tasa de penetración de cloruro por fenómenos de convección. Considerando los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir que existe un impacto limitado del uso de agregados reciclados sobre el ingreso de cloruro en los hormigones estudiados, con relación a/c 0,35 y aire intencionalmente incorporado. No se observaron diferencias significativas en la capacidad de retención y en la tasa de penetración de cloruro en relación con el contenido de agregado grueso reciclado. Cabe destacar que la baja relación a/c de los hormigones estudiados, que resultó en una disminución de la porosidad de las matrices y las interfaces compactas, produjo una reducción de la incidencia del agregado reciclado sobre las propiedades del hormigón.

En otro de los estudios relacionados con el ingreso de cloruros, se evaluó comparativamente el comportamiento de 4 hormigones convencionales de razón a/c 0,45 y 0,65 elaborados con diferentes tipos de agregados naturales (granito, cuarcita, basalto y rodado silíceo), respecto a 8 hormigones reciclados de iguales razones a/c a las indicadas (Zega *et al.*, 2015a). Todos los HR fueron elaborados empleando el AGR en un 25 y 75 % en volumen en reemplazo de los correspondientes agregados gruesos naturales. Las probetas moldeadas con los hormigones (convencionales y reciclados) fueron sumergidas en una solución de NaCl 30 g/l. Transcurridos 140 días de permanecer en la solución, los prismas fueron aserrados en forma perpendicular a su eje longitudinal, y se obtuvieron rodajas de 6 mm de espesor a distintas distancias de la cara expuesta, a fin de evaluar el ingreso de cloruros. De los resultados obtenidos se puede concluir que la influencia del contenido de agregados reciclados respecto al ingreso de cloruros es relativamente bajo. Los hormigones elaborados con agregado reciclado cuarcítico y rodados silíceos, donde la razón a/c potencial se redujo y las interfaces mortero-agregado mejoraron en comparación con los agregados naturales, el uso de agregados reciclados puede incluso significar una menor tasa de penetración de cloruro (figura 5).

Figura 5. Difusión de cloruro en hormigones convencionales y reciclados con distintos agregados naturales

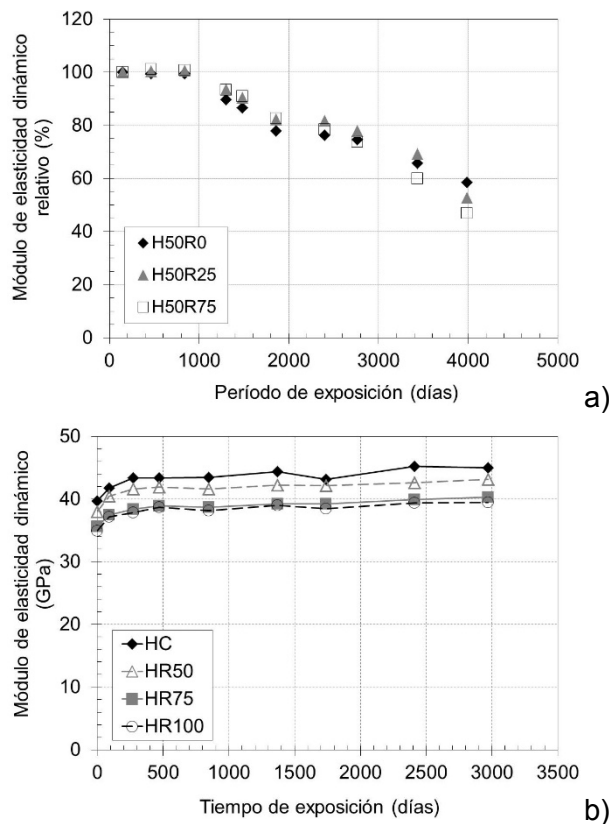


Otra temática relacionada con los HR se refiere a los estudios que se vienen desarrollando desde hace algunos años, los que tratan sobre el comportamiento durable de dichos hormigones cuando son expuestos a suelos con sulfatos (Zega *et al.*, 2016). En este sentido se trató de lograr información respecto al rendimiento durable de los hormigones reciclados expuestos a ataques de sulfato bajo condiciones de servicio similares a las que se producen en la realidad. Se estudiaron hormigones considerando en algunos casos la exposición a la cual iban a ser sometidos y otros hormigones ejecutados sin tener en cuenta dicha exposición. Se utilizaron diferentes porcentajes de reemplazo del agregado grueso natural por AGR (0, 25, 50, 75 y 100 %) los cuales se expusieron a un suelo con un alto contenido de sulfato de sodio durante más de diez años. Por lo indicado anteriormente, se elaboraron dos series de hormigones, una de las cuales poseía una relación a/c 0,50 ejecutándose un hormigón convencional y dos HR con 25 y 75 % de AGR, empleándose un cemento portland normal clasificado como moderadamente resistente a los sulfatos. En la otra serie se elaboraron hormigones de razón a/c 0,35, ejecutándose en este caso un hormigón convencional y tres HR con 50, 75 y 100[% de AGR y empleando un cemento portland compuesto y un aditivo incorporador de aire. Las probetas moldeadas con estos hormigones fueron colocadas semienterradas según su eje longitudinal en un suelo de arena que contenía 1 % de sulfato sódico, lo que representa un ambiente de agresión fuerte según el Reglamento Argentino (CIRSOC 201-2005).

La evaluación periódica de las probetas consistió en una inspección visual de cada una, en la descripción de los diferentes signos de daño encontrados (fisuración, desprendimientos del mortero, agregados expuestos, etc.), en el pesado y en la determinación de la frecuencia de resonancia según Norma ASTM C 215. Como resultado de este estudio

puede indicarse que los hormigones convencionales y reciclados con hasta un 75 % de AGR, diseñados sin considerar características específicas contra el ataque de sulfato, presentaron un nivel de degradación similar durante al menos 4000 días de exposición (figura 6. a.). La inspección visual confirmó que los sectores vulnerables eran los bordes y esquinas de los prismas, y ocurrió también una mayor degradación en la zona expuesta al aire, donde el hormigón fue afectado por la acción de mecha. Los valores del módulo de elasticidad dinámico en los hormigones convencionales y reciclados disminuyeron en forma similar a partir de los 900 días. El comportamiento observado puede ser atribuido a una resistencia similar a la cristalización de la sal, mientras que el uso de cemento moderadamente resistente a los sulfatos en el hormigón original, contribuyeron a evitar un aumento de la tasa de deterioro en la reacción entre los sulfatos y los agregados reciclados. En el caso de hormigones diseñados para durabilidad en ambientes tales como suelo sulfatado, es decir con una baja relación a/c, el uso de un cemento portland compuesto y aire intencionalmente incorporado permitieron que tanto el hormigón convencional como los reciclados presenten una excelente performance durante al menos 3000 días de exposición, incluso el HR con 100 % de contenido de AGR (figura 6. b.). Como conclusión general, se puede enunciar que, hasta la edad de evaluación, no se observa una influencia significativa del contenido de AGR sobre el comportamiento durable del hormigón expuesto a suelos con sulfato.

Figura 6. Variación del módulo dinámico de hormigones reciclados expuestos en suelo con sulfato



Agregados finos reciclados

Continuando con la temática de los HR, en este caso se hará referencia a los estudios realizados sobre las propiedades de los agregados finos reciclados (AFR) y su utilización en la elaboración de hormigones, a fin de determinar el comportamiento de dichos materiales bajo diferentes aspectos. Debe recordarse que existe muy poco conocimiento a nivel internacional respecto a estos materiales, hecho que ha llevado a que en algunas recomendaciones existentes se prohíba su utilización. Por tal motivo, los estudios se enfocan no solamente en la evaluación del AFR, sino fundamentalmente en las variables que pueden producirse cuando se lo utiliza en la elaboración de los hormigones, tanto en estado fresco como endurecido. Uno de los estudios realizados tuvo como principal objetivo evaluar diferentes propiedades (resistencia a compresión, módulo de elasticidad y contracción por secado) de hormigones de razón a/c 0,40; 0,50 y 0,60 empleando 20 y 40 % en volumen de AFR, en comparación con hormigones elaborados con esos mismos porcentajes de agregado fino granítico natural de trituración (AFGNT) (Sosa *et al.*, 2015). En principio se evaluaron distintas propiedades de los materiales a utilizar, observándose que los AFR presentan una menor densidad pero un mayor porcentaje de material que pasa el tamiz de 75 μm y mayor absorción de agua que el agregado fino granítico natural de trituración (figura 7).

En cuanto a los hormigones ejecutados, los resultados obtenidos indican que en estado fresco se obtuvieron similares consistencias debido a un incremento importante de aditivo superfluidificante empleado en los HR, mientras que el PUV (peso por unidad de volumen), en estos últimos, fue menor debido a la menor densidad que poseen los AFR. Las resistencias a compresión de los hormigones con AFR fueron similares y en algunos casos superiores a la de los hormigones convencionales (figura 8). Este hecho debe ser atribuido a una mejora en la zona de interfaz pasta-agregado debido a la mayor absorción que poseen los AFR. Respecto al módulo de elasticidad, para cada una de las razones a/c estudiadas, los valores fueron similares para ambos tipos de hormigones. Esto se atribuye a un efecto contrapuesto dado que los AFR poseen un menor módulo pero adquieren una mayor adherencia con la pasta.

Figura 7. Propiedades de AFR en comparación con AFGNT

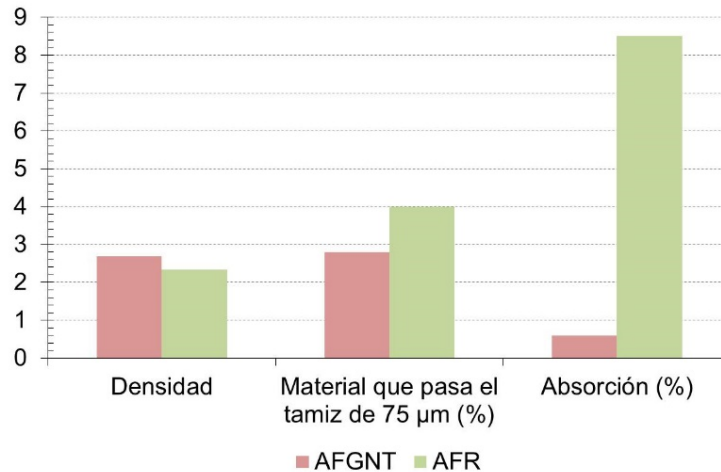
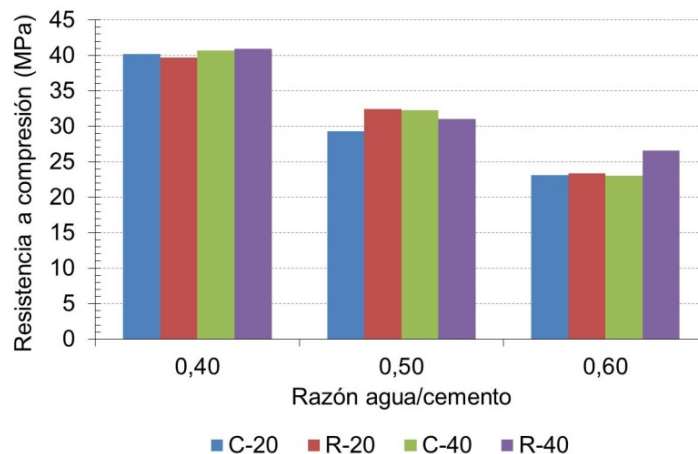


Figura 8. Resistencia a compresión de hormigones de distinta relación a/c, elaborados con 20 y 40 % de AFR



Con relación a la contracción por secado de los HR evaluada a la edad de 90 días, esta es similar en todos ellos independientemente de la razón a/c y el contenido de AFR, aunque es menor que la de los hormigones convencionales. Sin embargo, la relación contracción por secado frente a pérdida de peso indica un comportamiento marcadamente diferente entre los hormigones convencionales y reciclados, donde estos últimos presentan valores menores de contracción durante las primeras edades. Este comportamiento en los HR puede ser atribuido al agua absorbida por el AFR, lo que podría generar el retraso de la contracción. Después de 90 días, cerca del final de las curvas, la pendiente fue similar para ambos hormigones. Este hecho es atribuido a la completa eliminación del agua capilar y al mismo grado de contracción en la pasta.

En otro estudio, relacionado con esta temática, se analizó el comportamiento durable de los hormigones convencionales y reciclados antes mencionados, y se evaluaron diferentes propiedades de transporte tales como absorción de agua, succión capilar y penetración de agua a presión (Zega *et al.*, 2015b). Para la ejecución de los ensayos indicados,

se siguieron los lineamientos propuestos en las respectivas normas IRAM. De los resultados obtenidos surge que los hormigones con AFR presentaron una mayor absorción de agua (figura 9), la cual se incrementó con el aumento en el porcentaje de AFR empleado, hecho que está asociado con la mayor absorción que poseen los AFR debido al mortero adherido del hormigón original. Respecto a la absorción capilar, esta se incrementa con el aumento de la razón a/c, hecho que sucede para ambos tipos de hormigones. Se verificó también un leve incremento a medida que aumenta el contenido de AFR para las razones a/c más altas, hecho que está asociado con la mayor porosidad del nuevo mortero. En cuanto a la penetración de agua a presión, el comportamiento fue similar para ambos tipos de hormigones y no se observó ninguna influencia respecto al porcentaje de AFR empleado (figura 10), lo cual está asociado a una mejora en la zona de interfaz entre el agregado y la pasta. Considerando los resultados obtenidos en este estudio, puede concluirse que para las relaciones a/c estudiadas y los porcentajes de AFR utilizados, los HR presentan un comportamiento durable similar al de los hormigones convencionales.

Figura 9. Absorción de agua de hormigones de distintos niveles resistentes, elaborados con 20 y 40 % de AFR

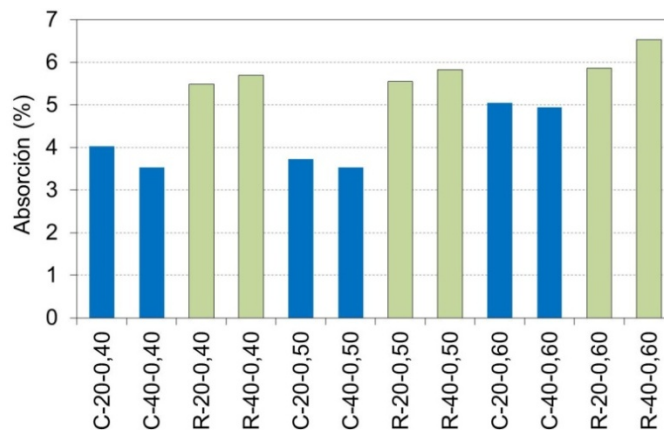
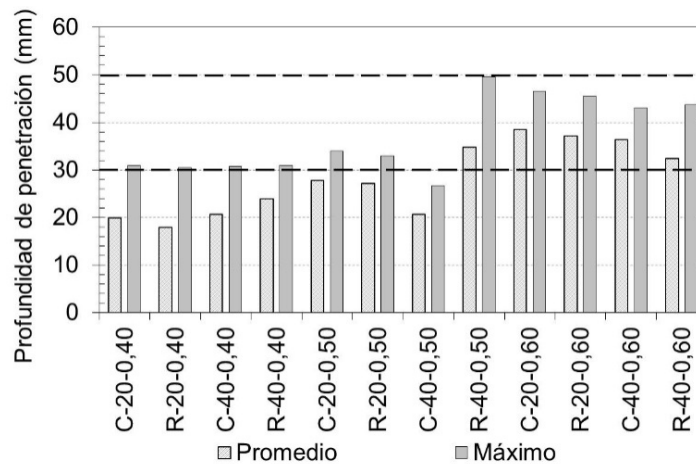


Figura 10. Penetración de agua a presión de hormigones convencionales y reciclados con 20 y 40 % de AFR

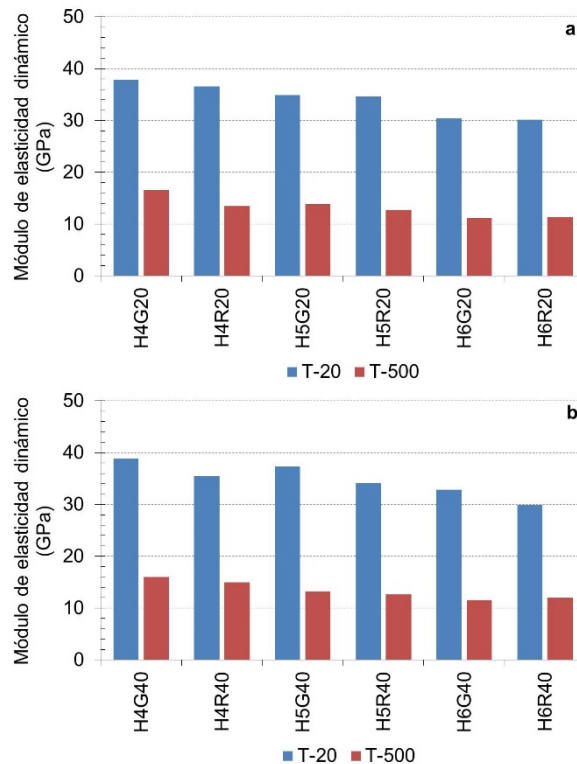


Otros estudios relacionados con los HR y sobre los cuales existen muy pocos antecedentes a nivel internacional, se refieren su comportamiento cuando son expuestos a altas temperaturas. Anteriormente se han realizado estudios sobre hormigones reciclados de distintas relaciones a/c, elaborados con distintos tipos de agregados gruesos naturales y con 75 % de AGR, que son expuestos a una temperatura de 500 °C durante diferentes períodos de tiempo (1 y 4 horas). El comportamiento de dichos hormigones fue comparado con el determinado en hormigones convencionales de similares características tecnológicas y elaborados en su totalidad con agregados naturales. En todos los casos los HR presentaron igual desempeño, e incluso mejor en algunos casos, al de los hormigones convencionales (Zega y Di Maio, 2006; Zega y Di Maio, 2009).

En el caso de los agregados finos reciclados, se evaluaron los hormigones con 20 y 40 % de AFR, los cuales fueron expuestos a temperaturas de 500 °C durante una hora. Los AFR procedían de hormigones elaborados con granito, y tal como fuera indicado anteriormente, poseen menor densidad y mayor absorción de agua que los agregados finos naturales de trituración. Por tal motivo, uno de los objetivos planteados fue justamente evaluar las posibles variaciones que pueden producirse respecto a hormigones elaborados con agregados finos naturales de trituración, para lo cual se evaluó comparativamente su resistencia residual. Se realizaron evaluaciones mediante el método ultrasónico y el de frecuencia de resonancia, determinándose las velocidades y módulos de elasticidad dinámico antes y después de someter a las muestras a altas temperaturas, a fin de chequear las modificaciones producidas por estas a nivel interno (Zega *et al.*, 2015c).

De los resultados obtenidos de los hormigones con AFR surge que la resistencia residual de los HR de menor nivel resistente después del calentamiento fue mayor que la de los hormigones convencionales, hecho que puede ser atribuido a una mejor compatibilidad entre el AFR y el nuevo mortero. Por otro lado, en todos los hormigones en estudio, las velocidades ultrasónicas determinadas después del calentamiento disminuyeron respecto a las determinadas antes del calentamiento. En los hormigones convencionales se observó una mayor degradación a medida que disminuye la resistencia, mientras que en los elaborados con AFR, en todos los hormigones se observó el mismo nivel de degradación (figura 11). Para ambos tipos de hormigones se ha determinado que para velocidades ultrasónicas menores a 3,0 km/s, estos presentan un grado de deterioro interno importante a pesar de que la resistencia a compresión fue similar a la determinada en muestras que no fueron calentadas. Los resultados obtenidos son válidos para los materiales utilizados y los porcentajes de AFR empleados, por lo cual habrá que continuar estudiando qué es lo que sucede cuando se utilizan otros tipos de agregados finos (cuarcita, basalto, rodados silíceos), debido a los diferentes coeficientes de expansión y conductividad térmica que poseen cada uno de ellos.

Figura 11. Módulo de elasticidad dinámico de hormigones convencionales y reciclados con 20 y 40 % de AFR, antes y luego de la exposición a alta temperatura



CONSIDERACIONES FINALES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las investigaciones llevadas a cabo hasta el presente en el LEMIT, puede indicarse que para el caso de elementos estructurales podrán utilizarse hormigones reciclados elaborados con hasta un 30 % de agregado grueso reciclado, para lo cual será necesario realizar un control riguroso de las propiedades de los materiales a utilizar. Este hecho conducirá a la obtención de hormigones reciclados con niveles de resistencia y durabilidad similares a los exigidos para los hormigones elaborados con agregados naturales de densidad normal. En aquellos casos en que las exigencias estructurales sean mínimas y no existan problemas de durabilidad, podrá utilizarse hasta un 100 % de agregado grueso reciclado. Respecto al agregado fino reciclado, debe considerarse el mismo concepto enunciado para el agregado grueso, ya que el empleo de hasta un 30 % conducirá a la obtención de hormigones con un adecuado comportamiento resistente y durable.

La tendencia de utilizar hormigones reciclados conduce a una reducción en los costos, ya que en algunos casos la generación de estos residuos se produce en el mismo lugar donde serán reutilizados, además de conservar materia prima no renovable y de reducir el consumo de energía en la generación de esta. Para poder cumplir con tal objetivo, es necesario contar con normativas o especificaciones de calidad que garanticen la obtención de hormigones reciclados con propiedades adecuadas.

Por último, un aspecto a tener en cuenta en la recuperación y reciclado de residuos de demolición, es que convergenal mismo tiempo intereses económicos y fundamentalmente medioambientales, siendo estos últimos los que deben prevalecer, ya que se obtendrá una mejora sustancial en la calidad de vida de los habitantes de cualquier ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2008). "ASTM C 215-02. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens". En *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES (2005). *CIRSOC 201. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina.

DI MAIO, A. A.; GIACCIO, G. y ZERBINO, R. (2002). "Hormigones con agregados reciclados". *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, CIC-LEMIT, n.º 9, pp. 5-10.

SOSA, M. E.; ZEGA, C. J. y DI MAIO, A. A. (septiembre, 2015). "Influence of Fine Recycled Aggregate on Compressive Strength, Static Modulus of Elasticity and Drying Shrinkage of Concretes". En *Memorias Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible*, La Plata, Argentina, pp. 311-319.

VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. A.; ZEGA, C. J. y DI MAIO, A. A. (abril, 2016). "Chloride Ingress and Binding in Air-Entrained Recycled Aggregate Concrete". En *Proceedings of the 6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials Lat-Rilem Conference*, Cali, Colombia, pp. 815-822.

ZEGA, C. J. y DI MAIO, A. A. (2006). "Recycled Concrete Exposed to High Temperatures". *Magazine of Concrete Research*, vol. 58, n.º 10, pp. 675-682.

ZEGA, C.J. (2008). *Hormigones reciclados: caracterización de los agregados gruesos reciclados* (tesis de grado; director: Ángel A. Di Maio).Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

ZEGA, C. J. y DI MAIO, A. A. (2009). "Recycled Concrete Made with Different Natural Coarse Aggregates Exposed to High Temperature". *Construction and Building Materials*, vol. 23, n.º 5, pp. 2047-2052.

ZEGA, C. J.; VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. A. y DI MAIO, A. A. (2015a). "Chloride Diffusion in Recycled Concretes Made with Different Types of Natural Coarse Aggregates". En *Memorias Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible*, La Plata, Argentina, pp. 393-402.

ZEGA, C. J.; SOSA, M. E. Y DI MAIO, A. A. (2015b). "Transport Properties of Recycled Fine Aggregate Concretes". En *Proceedings XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components (XIII DBMC)*, San Pablo, Brasil, pp. 1065-1072.

ZEGA, C. J.; SOSA, M. E. y DI MAIO, A. A. (2015c). "Recycled Fine Aggregate Concretes Exposed to High Temperature". En *Memorias Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible*, La Plata, Argentina, pp. 280-289.

ZEGA, C.J.; COELHO DOS SANTOS, G.S.; VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y.A. y DI MAIO, A. A. (2016). "Performance of Recycled Concretes Exposed to Sulphate Soil for 10 Years". *Construction and Building Materials*, vol. 102, parte 1, pp. 714-721.