

# CONSIDERACIONES PRELIMINARES AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS EN PROVINCIA DE BUENOS AIRES

## PRELIMINARY CONSIDERATIONS TO THE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE STRUCTURES IN THE PROVINCE OF BUENOS AIRES

Lucio Maselli<sup>1,2</sup>, Yury Villagrán<sup>1,3,5</sup>, Gustavo San Juan<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> LEMIT, CICPBA, B1900AYB, La Plata, Argentina, [hormigones@lemit.gov.ar](mailto:hormigones@lemit.gov.ar)

<sup>2</sup> ANPCyT, C1425FQD, CABA, Argentina, [lucio.maselli@cyt.cic.gba.gov.ar](mailto:lucio.maselli@cyt.cic.gba.gov.ar)

<sup>3</sup> CONICET, B1904CMC, La Plata, Argentina

<sup>4</sup> IIPAC-UNLP, B1900GGD, La Plata, Argentina, [iipac@fau.unlp.edu.ar](mailto:iipac@fau.unlp.edu.ar)

<sup>5</sup> Magnel Vandepitte Lab, Ghent University, 2P55+V4 Gante, Bélgica

### RESUMEN

El presente trabajo aborda el pensamiento de ciclo de vida y la economía circular en la producción de estructuras de hormigón armado, y el estado de la cuestión del reciclado de hormigón en Argentina, particularmente en las condiciones bonaerenses, en comparación con la bibliografía internacional disponible. Se basa en un análisis crítico de artículos recientes en la materia, sobre el análisis de ciclo de vida (ACV) de la producción de agregados gruesos reciclados y hormigones elaborados con dichos agregados. Apunta a contrastar la información contenida en la literatura seleccionada a partir de la profundidad o cobertura de cada análisis, con las particularidades del contexto local. A partir de la discusión, se trazan lineamientos para investigaciones futuras.

**Palabras clave:** *Análisis de Ciclo de vida, Hormigón reciclado, Economía Circular.*

### ABSTRACT

This paper addresses life cycle thinking and the circular economy in the production of reinforced concrete structures, and the state of the art of recycling concrete in Argentina, particularly in Buenos Aires conditions, in comparison with the international bibliography available. It is based on a critical analysis of recent articles on the subject of the life cycle assessment (LCA) of the production of recycled concrete aggregates and concrete made with said aggregates. It aims to contrast the information contained in the selected literature based on the depth or coverage of each analysis, with the particularities of the local context. From the discussion, guidelines for future research are drawn.

**Keywords:** *Life Cycle Assessment, Recycled Concrete, Circular Economy.*

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la tecnología del hormigón se están investigando múltiples estrategias para mejorar la eco-eficiencia del hormigón. En general hay consenso sobre la metodología para validar las estrategias enmarcada en lo que se denomina análisis de ciclo de vida (ACV), con variantes metodológicas encuadradas dentro de la norma ISO 14044 [1]. En Argentina, desde 2016, con la norma IRAM 1531 [2], se permite hasta un 20% de reemplazo del agregado grueso natural (AGN) por agregado grueso reciclado (AGR) para la elaboración de hormigones en masa de hasta 30 MPa, para usarse en las condiciones ambientales A1, A2, A3, M1, Q1, y C1 según el Reglamento CIRSOC 201:2005 [3]. No obstante, no existe una implementación generalizada de la estrategia de reciclado, y parte de las limitaciones se deben a que no existen las plantas necesarias para efectuar la trituración, la separación de gruesos y finos, y la limpieza del material ferroso y contaminantes.

10

En nuestro país los residuos de construcción y demolición (RCD) están contemplados como parte de las corrientes de residuos sólidos urbanos (RSU) por la Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU), no existiendo marco normativo nacional específico sobre RCD. La estrategia mejoró la gestión de los RSU en general, aunque en cuanto a los RCD, al no haber procedimientos normativos, la parte mayoritaria se maneja con volquetes privados, fuera de cualquier regulación, que muchas veces disponen los residuos en vertederos clandestinos. Existen contadas excepciones en algunos distritos como la CABA, en los que la gestión de residuos municipal incluye los RCD, que son clasificados y comercializados, obteniendo por un lado el cascote de mampostería y hormigón, cuando es imposible separar las fracciones, y por el otro los agregados de hormigón reciclado, producto de demoliciones selectivas en las que los bloques de hormigón llegan a planta con bajo contenido de contaminantes. La obtención de agregados reciclados de hormigón a partir de material de demolición proveniente

de obras de construcción inespecíficas, se ve dificultada por falta de protocolos para demolición selectiva y gestión de los RCD en obra, que disminuyan la contaminación de los agregados. Esto puede atribuirse, en principio, a la falta de legislación específica, y a la poca experiencia local de reciclado. Por lo tanto, la producción actual de agregados reciclados en Argentina se deriva casi completamente a partir de obras específicas de demolición de hormigón, generalmente pavimentos, coordinadas previamente entre las partes interesadas, y de la trituración de hormigón de corte como residuo de las mismas plantas elaboradoras. Sin embargo, la aplicación de este agregado reciclado es principalmente para bases y sub bases de pavimentos, implicando un cierto infrarreciclaje y pérdida de oportunidad en usos de mayor valor. El reciclado de RCD podría optimizarse notoriamente si se analiza el ciclo de vida completo de las estructuras.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta metodológica que fue creada para medir la eco-eficiencia de un producto o servicio. Consiste en la elaboración de un sistema con ingresos y egresos cuantificados de energía y materia, a modo de balance del proceso en estudio. Fue creada en Europa en los 70 y evolucionó a través de congresos y reuniones de trabajo impulsada por organizaciones como la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) hasta ser normalizada por la norma ISO 14044 [1], en 2006. A partir de ese momento, se consolidó como la principal herramienta para hacer comparaciones de eco-eficiencia y apoyar decisiones informadas en este aspecto a nivel mundial. La herramienta se organiza en 4 pasos: i) definición de alcance y objetivos, ii) análisis de inventario, iii) análisis de impacto, iv) interpretación. A grandes rasgos, tiene dos formas de evaluar el impacto, una es definir las cargas ambientales que tienen un daño potencial (punto medio) y la otra es determinar el impacto ambiental como un hecho consumado (punto final).

Si bien el marco normativo de ISO permite unificar criterios metodológicos a nivel mundial, las bases de datos usadas para los inventarios deben ser producidas atendiendo condiciones locales para el área de cada estudio, definiendo la precisión necesaria según el alcance y los objetivos planteados en cada estudio. En el caso de Argentina, y en la mayoría de los países de ingresos medios y bajos, las bases de datos tienen un desarrollo incipiente. A nivel local existe la Red Argentina de Ciclo de Vida [4], que realiza congresos anuales desde 2013 y plantea el interés por desarrollar inventarios nacionales. Por lo tanto, en términos locales, las principales limitaciones actuales que se encuentran para la aplicación del ACV en la producción y uso de hormigón y otros materiales cementicios es la escasa información local que permita la confección de un inventario confiable. La realización de inventarios con bases de datos internacionales permiten una primera aproximación, pero es importante la consideración de los condicionantes locales para alcanzar valoraciones e interpretación precisas.

### Herramientas para estudios de ACV

Para elaborar los estudios preliminares de ACV, se tomó el criterio de usar herramientas informáticas de acceso libre, adoptándose el programa de acceso libre Open LCA 1.10.2 [5], de origen alemán. Junto con el programa es necesario definir una base de datos de inventario, en nuestro caso, siguiendo las recomendaciones de Marinković [6] acerca de inventarios de ciclo de vida (ICV) de hormigones, optamos por usar EcoInvent, en su versión 3.6 [7], de origen suizo. Esta base de datos comercial tiene una versión gratuita para países no miembros de la OCDE, como Argentina, y por lo tanto resulta ampliamente aplicable a nivel local. De dicha base de datos pueden obtenerse los ítems para armar los inventarios de la producción de hormigones nuevos, pero no así para hormigones reciclados. El problema más común en estudios exhaustivos con ACV, reside en la fiabilidad de las bases de datos comerciales que, por temas de derechos de propiedad, no siempre

permiten acceder al origen de sus cifras. Es por este motivo que autores que han profundizado en el tema de ACV de hormigones como Gursel [8] y ACV de estructuras como De Wolf [9], plantean la necesidad de establecer herramientas propias con datos fehacientemente obtenidos de fuentes públicas. Aún así, se considera que las bases de datos disponibles permiten una primera aproximación que puede ser luego mejorada respecto a su fiabilidad y fidelidad respecto de los condicionantes locales.

El presente trabajo es un aporte para impulsar la creación de un marco normativo sobre RCD que posibilite la producción de agregados reciclados y hormigón reciclado a gran escala, tomando en cuenta su impacto real con una visión integral. Para valorar la potencialidad local del reciclado, se analizaron y contrastaron -con los condicionantes locales - 3 fuentes bibliográficas principales según cada tema a trabajar: para la producción de agregados reciclados en planta fija [10], para la producción de agregados reciclados con planta móvil [11] y para el ACV de HAR [12].

### Producción de Agregados Gruesos Reciclados

Es importante tener una correcta taxonomía de los residuos para valorar las estrategias de reúso y reciclado y los distintos sistemas de producto que puedan plantearse en estudios de ACV correctamente [13]. Existen 4 escenarios típicos para la producción de agregados gruesos reciclados (Figura 1), en orden creciente de acuerdo al volumen de hormigón que representan son: reciclado de probetas y hormigón de corte en plantas hormigoneras y reciclado de probetas y piezas premoldeadas defectuosas en plantas de prefabricados (los dos escenarios centrales en la Fig. 1), planta móvil para grandes obras de demolición selectiva de hormigón (escenario a la izquierda en Fig. 1), y planta fija como parte de un sistema de gestión de RCD (escenario a la derecha en la Fig. 1). En primer lugar, cabe realizar una distinción entre dos grupos de escenarios. En los dos últimos escenarios mencionados se trata el manejo de fin

de vida de estructuras construidas a través de la demolición, y constituyen por lo tanto gestión de RCD propiamente dicha. Los dos primeros tratan de una gestión de los residuos industriales, en un caso el de la industria del hormigón elaborado, es decir del reciclado de un material de construcción a materia prima (AGR), y en el otro de la industria del hormigón prefabricado con el reciclado de elementos y componentes manufacturados a materia prima, bajando dos niveles en la jerarquía de reúso y reciclado en la construcción planteada por Crowther [14]. Esto sucede porque se convierten elementos constructivos en agregados reciclados a usarse como materia prima en la confección de nuevos elementos estructurales. Cada escenario requiere un enfoque diferente, así como también una ponderación de la contribución que cada uno de ellos hace para desarrollar una economía circular, donde esta última se considera como una estrategia que tiene por objetivo reducir tanto la entrada de los materiales vírgenes como la producción de desechos, cerrando los «bucles» o flujos económicos y ecológicos de los recursos [15].

12

Es difícil determinar el volumen de hormigón de deshecho que actualmente se recicla localmente, ya que no es una práctica normalizada y las iniciativas privadas son motivadas por el beneficio económico o por dificultades estacionales con

el abastecimiento de los AGN en períodos de gran demanda, alternados con períodos de baja actividad, que hacen que las empresas que tienen canteras se ajusten para evitar riesgos, perdiendo capacidad de abastecimiento. Este factor, que en principio es señalado en la industria como un factor negativo propio de la incertidumbre económica del país, es una oportunidad para valorizar la estrategia de procesamiento centralizado en plantas de reciclado de RCD, ya que permitiría incrementar la capacidad de stockeo de agregados, a la vez de resolver el problema de los RCD. Se configura entonces una práctica dispersa sobre la que existe casi nulo registro. Algunos indicios pueden obtenerse de la consulta a fabricantes de maquinaria nacional específica, como Vibromaq, radicada en José León Suárez, que produce alimentadores y zarandas vibratorias necesarias para obtener AGR a escala industrial. En los últimos cuatro años, esta empresa proveyó de dichas máquinas a varias hormigoneras del AMBA, que tenían dificultad para obtener el AGN de Olavarría, ya que hubo fuerte demanda de hormigón por la obra pública en este período. Este incremento esbozado por el fabricante coincide con las variaciones en las cifras de reciclado de la firma LOMAX [16]. Esto también coincide con la nueva aceptación de la norma IRAM 1531, por lo que puede considerarse un indicio del impacto que ha tenido la aprobación de incorporación del

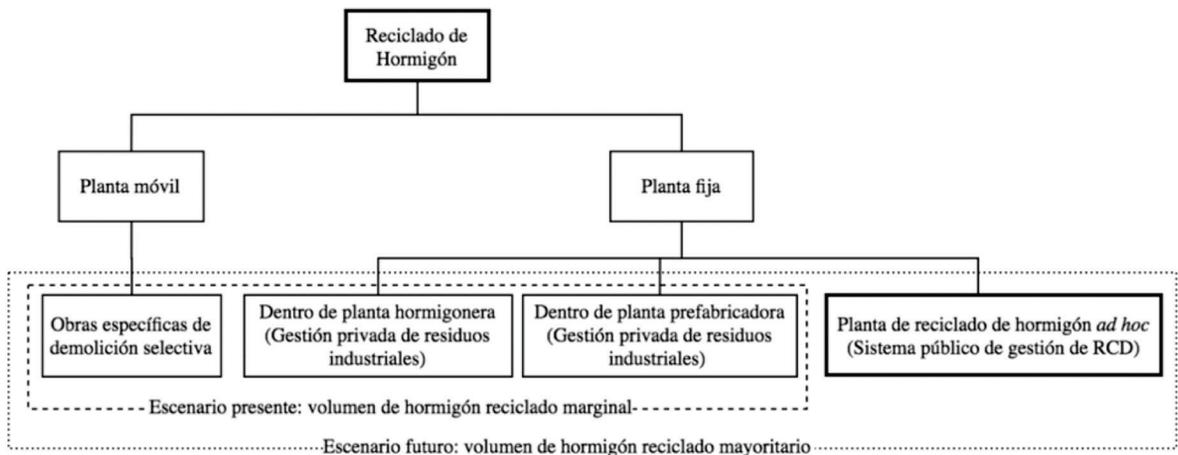


Figura 1: Escenarios de reciclado de hormigón en Argentina.

20% de AGR. Existen por lo tanto señales de la viabilidad económica conjunta con la conservación de rocas naturales en el escenario dentro de plantas hormigoneras en el AMBA. Ciertamente los residuos industriales dentro de la planta resultan menores al límite del 20% de agregado grueso, por lo que el esquema normativo actual permitiría mayor absorción de residuos de hormigón, por las plantas hormigoneras.

Cabe señalar que, al utilizar una planta de reciclado móvil en zonas urbanas, la emisión de material particulado, producto de la trituración, es crítica por la afección que hace a las zonas aledañas. Esto hace evidente la necesidad de contar con plantas que tengan medios que eviten la propagación del polvo. Para ello deben usarse una serie de dispositivos, como cabinas cerradas, aspiradora de polvos e hidratación de los agregados en la trituradora, zaranda y máquina descontaminante. Esto puede significar una desventaja de la aplicación de plantas móviles en zonas urbanas, donde es probable que resulte más conveniente la aplicación de plantas fijas en zonas industriales aptas para recibir el impacto que las mismas generan. Por otra parte, el uso de plantas fijas incrementa el impacto debido al transporte. El balance de impacto ambiental y económico puede hacerse solamente a partir de la interpretación del ACV respectivo.

Con el objetivo de favorecer esta incorporación de residuos de hormigón en la cadena de producción y otras mejoras para la sostenibilidad, se enumeran distintas prácticas y ámbitos que hacen al manejo de los residuos de hormigón, tanto industriales, como provenientes de RCD, y se apuntan las tareas necesarias a realizar en estudios futuros, para obtener los datos para ACV consistentes con las características de la producción local.

#### *Agregados provenientes del lavado de camiones motohormigoneros*

La práctica más común de reciclado, es la recuperación de los agregados naturales producto

del lavado de los camiones motohormigoneros. Esto se debe a que no requiere de equipamiento específico y es un subproducto del necesario proceso de limpieza. La recuperación de los agregados insume una cantidad de agua y otros recursos extra para la limpieza, así como un tamizado que habrá que tomar en cuenta en el ACV. Resulta entonces posible definirlo como subproducto a partir de la inversión de recursos que requiere su acondicionamiento. Esto implica que las cargas involucradas pueden ser asignadas a estos agregados recuperados, y descontadas del hormigón fabricado que les dio origen, de manera que podría contribuir notablemente a la reducción del impacto del hormigón elaborado.

#### *Agregados recuperados del lavado de hormigón fresco sobrante*

Esta práctica se puede realizar con una lavadora con tornillo, la cual consume aproximadamente 4 m<sup>3</sup> de agua por cada m<sup>3</sup> de hormigón. También se puede descargar en piletones con agua para separar por decantación, donde la pasta se separa del agregado y una vez recuperado se le agrega un acidulante para neutralizarla y se la dispone en tambores de 200 l. A primera vista, este proceso es ineficiente por el gran consumo de agua, y la gran cantidad de material (toda la pasta) que lleva a la disposición, que debe ser tratada para neutralizarla. Según lo relevado esta práctica se encuentra prácticamente en desuso, salvo en el caso de pequeñas hormigoneras que lavan volúmenes reducidos en bateas abiertas.

#### *Recuperación del hormigón fresco sobrante en agregados reciclados mediante el uso de químicos*

En el mercado local, la firma trasnacional Mapei comercializa el producto Re-Con Zero Evo, fabricado en Italia, que tiene como finalidad recuperar el hormigón sobrante en forma de agregados reciclados. El producto se presenta en un polvo de dos componentes, que se agregan al hormigón en el camión motohormigonero, generando la aglomeración de la pasta en torno de

los agregados, e inhibiendo la acción cementante posterior. Tras realizarse una mezcla -según indicaciones- se vuelca el material, que estará listo para usar en algunas horas. Las principales ventajas frente a la recuperación por lavado en estado fresco o trituración cuando se lo deja endurecer, es que no insume agua ni trituración para obtener el reciclado, e incluso reduce la cantidad de agua necesaria para lavar el camión. Ahora bien, es necesario, para hacer una justa evaluación de su eco-eficiencia, contar con información detallada de su composición y producción, a través de una declaración ambiental de producto (DAP). Para ello se obtuvo la DAP por parte de la firma [17], la cual será analizada con el fin de verificar su validez según norma ISO 14044 para realizar estudios comparativos. A su vez, es necesario hacer pruebas experimentales del posible lixiviado de dichos químicos en matrices con diferentes porcentajes de reemplazo del AGN. Las propiedades finales de los AGR obtenidos (granulometría, absorción de agua, dureza) son asimismo fundamentales para definir su impacto a través de ACV, ya que permiten definir adecuadamente la unidad funcional, así como verificar el impacto en otros procesos o demandas de materiales (por ejemplo, el contenido unitario de cemento requerido en los hormigones elaborados con estos AGR).

#### *Manejo del hormigón sobrante por endurecimiento segregado para posterior trituración*

Una forma de manejar el residuo industrial de hormigón es verter el sobrante en un patio destinado a tal fin, e ir segregándolo mecánicamente a medida que va endureciendo, para evitar la formación de grandes bloques y poder ingresar el material directamente a la planta de procesamiento sin tener que reducir el tamaño de los bloques o partículas endurecidas por demolición. La principal ventaja de este método es que no usa agua, a diferencia del lavado de hormigón fresco, y que genera un volumen menor de residuos. La principal desventaja es la generación de polvo en la trituración, sobre todo cuando las plantas de reciclado se encuentran en zonas urbanas, y la emisión de material

particulado se convierte en el principal impacto sobre la salud humana en la escala de proximidad. Por los relevamientos efectuados, en Argentina en la actualidad, no hay plantas de trituración, ni importadas ni nacionales, que tengan control de emisión del material particulado. Sí existen máquinas que cuentan con el diseño preparado para incorporar cabinas y cañerías de aspiración, pero no se tiene conocimiento de ninguna planta que lo esté implementando.

#### *Capacidad productiva respecto al manejo de residuos de hormigón endurecido en hormigoneras*

Según consultas realizadas a hormigoneras locales, el hormigón de corte normalmente no alcanza el 0,5% de la producción total, y es usado para obras dentro de las plantas, o triturado y reprocesado en los casos en los que la hormigonera cuenta con trituradora y zaranda. Por lo tanto, es necesario realizar una estadística acerca de esta práctica, sobre la base de una encuesta a las hormigoneras, lo que permitiría una cuantificación certera del volumen de desechos de hormigón que la industria del hormigón elaborado puede absorber efectivamente.

Una estimación preliminar permitiría tener una visión de la magnitud. Considerando únicamente al AMBA, las estadísticas de la Asociación Argentina del Hormigón Elaborado (AAHE), que reúne a las principales empresas del sector, reporta una producción de hormigón elaborado según la Tabla 1 [18]. Este volumen representa casi el 50% de total de hormigón elaborado producido en Argentina. Asumiendo un contenido unitario de agregado grueso típico de 1000 kg/m<sup>3</sup> y el 20% límite establecido por la norma IRAM 1531, tenemos un estimado de 528 mil toneladas. Posteriormente se debería descontar entre 13 mil y 26 mil toneladas (0,5 a 1 % del volumen producido), que corresponde a hormigón de corte y otros residuos de hormigón de las mismas plantas que actualmente se reciclan). Por lo tanto, la estimación preliminar permite definir que podrían ahorrarse hasta 500 mil toneladas

de rocas naturales bonaerenses con aplicación en hormigón (principalmente granito de la zona de Olavarría), si se implementara un sistema de valoración de hormigón de demolición.

#### *Manejo de residuos de hormigón en plantas de prefabricados*

El ámbito de la prefabricación requiere también opciones para la gestión de sus residuos. Por ejemplo, uno de los mayores productores de prefabricados en Argentina, Astori, informa algunos escenarios posibles. Por un lado, un promedio informado de solo 3 piezas defectuosas por año constituye un volumen exiguo de hormigón a reciclar. Por otro lado, con mayor incidencia (y sin armadura, lo que facilita su reciclado), la planta de prefabricación informa 3000 probetas cilíndricas de 15 cm x 30 cm al año, constituyendo un volumen anual de 16 m<sup>3</sup> (o 38 toneladas). En un esquema de reemplazo máximo del 20% de la masa del AGN, en conformidad con IRAM1531, serviría para producir 190 m<sup>3</sup> de HAR con 1000 kg/m<sup>3</sup> de agregado grueso. Con estos volúmenes, el costo del equipamiento necesario para reciclar dentro de la planta parece difícilmente justificado, pero tampoco existe un centro de reciclado disponible como para tercerizarlo. Cabe mencionar que, en el caso de los prefabricados, al tener armaduras, su reciclado es más dificultoso que el del hormigón de corte de las hormigoneras, pero al ser un producto industrializado el proceso es más fácil de implementar y con menos contaminantes que en el hormigón de demolición de edificios tradicionales.

#### *Grandes obras de demolición de hormigón*

Respecto del hormigón demolido en grandes obras, la renovación de pavimentos con plantas móviles constituye la práctica más sencilla de implementar, y de la que pueden encontrarse referencias en Argentina. En la figura 2 se pueden ver distintos esquemas de demolición de hormigón, según el reporte ACI-555-01 [19].

Una experiencia pionera fue desarrollada a fines del 2005 por el LEMIT en cooperación con la dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, con la construcción de un tramo experimental en una vía de tráfico pesado en la circunvalación y el acceso al puerto de Quequén, en Necochea. Si bien los resultados no fueron los esperados por el grupo de trabajo, principalmente por patologías constructivas debidas a dificultades que se presentaron para controlar la ejecución, esta experiencia proveyó información valiosa [20], sobre todo respecto a la gestión del residuo de hormigón y su uso. La utilización de la fracción fina (tamaños menores a 4 mm) y la contaminación del agregado con suelo, aumentó significativamente la demanda de agua, al mismo tiempo que redujo la resistencia y la durabilidad. Por lo tanto, estos aspectos requieren mayor atención respecto al diseño de las mezclas de hormigón reciclado y su implementación en el campo.

En el caso de la firma LOMAX, el uso de AGR representó en el período 2011-2019 un promedio del 3,7 % sobre el consumo total de agregados, con un pico de 5,7 % en 2018, e importantes beneficios económicos y ambientales [16], constituyendo

**Tabla 1.** Producción de hormigón elaborado empresas de la AAHE en 2019, zona AMBA [18].

Subzona	Miles de m <sup>3</sup>
CABA, Riachuelo, San Vicente, Florencio Varela y Berazategui	1.034
La Plata, Gonnet y Berisso	86
GBA Norte	996
GBA Oeste	524
<b>TOTAL</b>	<b>2640</b>

una gran experiencia reproducible para otras empresas hormigoneras de menor escala. Una obra de referencia por su escala en relación al hormigón reciclado fue la renovación de la pista de Aeroparque, en la que el hormigón demolido fue transportado a las plantas de LOMAX ubicadas en el AMBA, constituyendo una experiencia fundante para la empresa en los aspectos prácticos del reciclado a escala industrial. El principal problema que afrontaron fue la emisión de material particulado y su afección a zonas urbanas circundantes. Por su parte, la firma Fenomix posee amplia experiencia en el reciclado, gran cantidad de equipamiento, y cuenta con un importante acopio de agregados reciclados en la ribera del río Luján, alejado de zonas urbanas, lo que evita problemas de afección a zonas urbanas con la emisión de material particulado. Su actividad relacionada al reciclado de hormigón se puede sintetizar en 4 modalidades: i) procesamiento del hormigón con planta móvil para el reúso in situ en grandes obras de demolición de hormigón como pavimentos, ii) retiro de los RCD de hormigón en bloques en

grandes obras de demolición para procesarlos en su planta y comercializarlos, iii) retiro de residuos industriales de hormigón de plantas hormigoneras para procesar y comercializarlos en sus instalaciones, iv) servicio de procesamiento in situ en plantas hormigoneras de sus residuos de hormigón. A la fecha, esta empresa estima que su acopio de agregados reciclados puede abastecer de 6 a 7 meses de producción con el ritmo actual, y considera estratégica dicha posesión para eventuales picos de demandas producto de la ejecución de obras de infraestructura. A su vez, la empresa informa que la mayoría de sus agregados, tanto en la fracción fina como en la fracción gruesa, están siendo demandados como insumos para bases y sub bases de pavimentos, siendo excepcional su comercialización a hormigoneras para la producción de hormigón estructural.

*Revisión del caso de estudio de una planta fija de reciclado.*

A los fines de introducir las características de

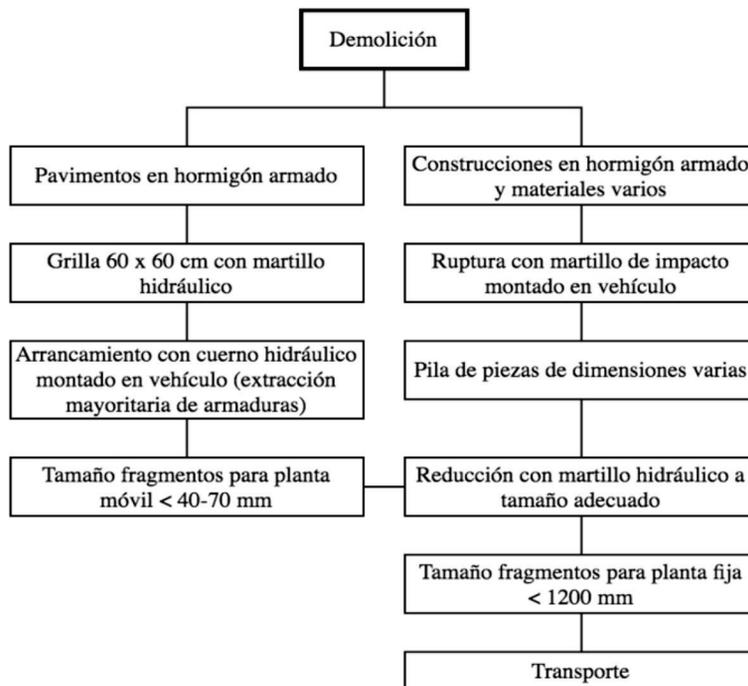


Figura 2: Esquemas de demolición, elaboración propia según reporte ACI-555-01 [19].

las plantas estacionarias para procesamiento de RCD, se presenta en la Figura 3 [19] un esquema de planta estacionaria del tipo de segunda generación, que dispone, además de los medios de trituración y tamizado, dispositivos de limpieza de contaminantes y de control de emisión de polvo (material particulado). La única planta que se asemeja a este tipo, aunque sin control de polvo, de la cual se pudo tomar registro en el ámbito nacional, es la operada por Evasa S.A. en el centro de reciclaje de la CABA. Es necesario recabar información detallada adicional sobre esta planta de reciclado para adoptarla como referencia para un estudio de ACV detallado del reciclado, obteniendo datos primarios consistentes con la tecnología implementada localmente.

La investigación de Ghanbari et al. [10], si bien no es un estudio de ACV y tiene un alcance limitado, serviría de base para diseñar un modelo propio de planta. En dicho artículo se plantea la comparación en cuanto a los consumos de energía eléctrica y emisiones de CO<sub>2</sub>eq, entre una planta de reciclado

fija y una cantera marina. Los condicionantes locales son relevantes, y debe tenerse en cuenta que la investigación de referencia se sitúa en Irán. Puede extraerse información válida en función de una estructura económica y productiva comparable y aplicable al contexto argentino y bonaerense, pero debe tenerse presente que esto implica una simplificación que debe ser luego abordada con mayor profundidad a partir de la recopilación de información a nivel local.

En primer lugar, resulta de interés el planteo de una planta fija de reciclado de segunda generación, lo que permite obtener agregados gruesos, intermedios y finos, libres de contaminantes, en este caso con una capacidad de 200 t/h. En [10] se aporta un listado de la maquinaria y las horas de funcionamiento, y se calculan los consumos generados en el funcionamiento normal de 8 h diarias a 200 t/h durante un año. El lay-out de la planta es una versión simplificada del esquema de planta de segunda generación esbozado en el reporte ACI 555R-01 (Figura 3). El diseño fue

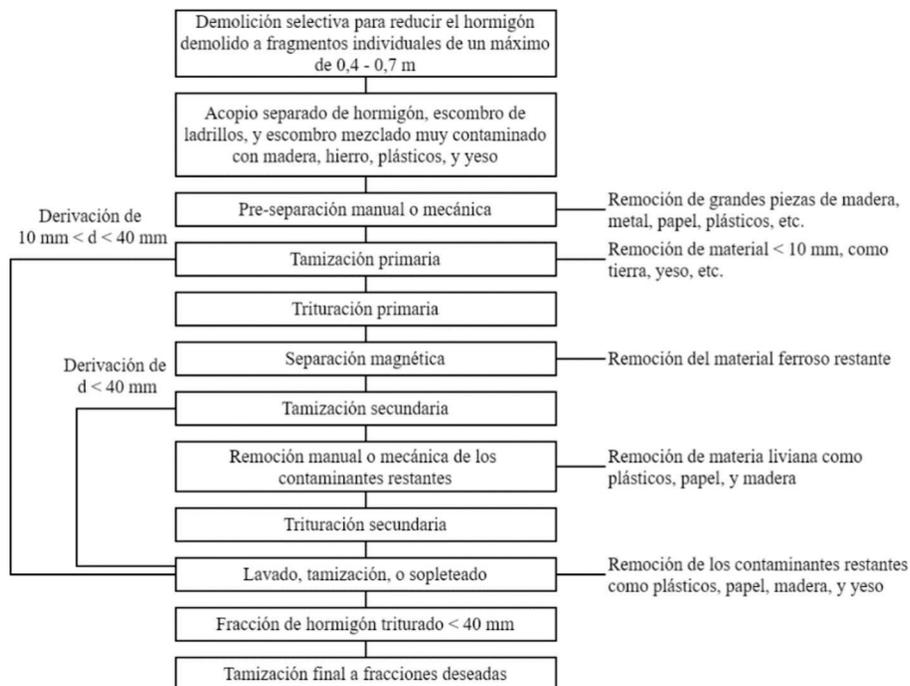


Figura 3: Planta de procesamiento de hormigón de demolición (adaptado de [19]).

realizado por la empresa de maquinaria china Zhengzhou Yifan Machinery Co., Ltd. No se dan precisiones sobre la locación o fecha por lo que resultan fuentes adicionales de incertidumbre. La planta tiene una única zaranda (en lugar de dos), y dos instancias de separación manual (en lugar de una). Se supone que esta decisión obedece a una reducción de maquinaria para disminuir el monto de la inversión inicial, y también justificada por la relación entre costos de maquinaria y mano de obra en el contexto nacional. La planta tiene características tecnológicas que en una primera aproximación parecen válidas para su implementación en el contexto local, ya que la mayoría de las máquinas y equipamiento necesario se producen localmente.

Con respecto al alcance del estudio, se limita a los consumos energéticos de electricidad y de diésel, y las emisiones de CO<sub>2</sub>eq. Se concluye que, al cabo de 20 años de funcionamiento de la planta de reciclado, se ahorrarían en la producción de agregados aproximadamente un 30% de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>eq. Este cálculo fue realizado con las características actuales de la matriz energética de Irán. Para el caso argentino es necesario tomar en cuenta la composición de la matriz energética local, por lo que no se puede trasladar directamente sus resultados. Igualmente es esperable tener una buena aproximación considerando que en ambos países el gas natural y el petróleo tienen alta participación como fuentes de generación de electricidad con una cierta ventaja ecológica para Argentina (en Irán: 71% y 21%, respectivamente, en 2014 [21]; en Argentina: 57% y 14%, respectivamente, en 2016 [22]).

En cuanto al tipo de cantera que se toma en [10], se trata de un yacimiento marino, del cual no se especifican más características que el listado de máquinas usadas. Se listan 2 topadoras diésel, sin especificar si la extracción se realiza directamente con topadoras o se realiza una tarea previa de dragado. Para el caso de la provincia de Buenos Aires, por tratarse de explotaciones mineras mediterráneas, en las que la extracción de la piedra

se hace normalmente por medio de voladuras con explosivos insertados en la roca, es fundamental contemplar las importantes cargas ambientales de dichos procesos destructivos, y la transformación del hábitat y territorio que generan las canteras. En este sentido, el proceso extractivo de roca natural resulta ampliamente desfavorable para las condiciones en AMBA en comparación con el estudio [10]. Aunque resulte obvio, cabe señalar que, minimizando su explotación, estaríamos preservando un recurso natural no renovable y estratégico para el futuro.

### **Producción de Hormigón Elaborado con Agregados Reciclados**

Primeramente, es importante definir los factores de incidencia en función de su impacto en el ACV. La literatura es consistente en definir al contenido de cemento como el más relevante, pero es necesario hacer definiciones con mayor detalle. Gursel [8] realiza en su tesis doctoral una revisión de los estudios de ACV de hormigones publicados, realizados según norma ISO 14044 y establece un análisis de sensibilidad para definir los factores de incidencia de los materiales o procesos constituyentes de los hormigones para el contexto turco, que es comparable al argentino en lo que respecta a la composición de la matriz energética. Las principales estrategias tendientes a la eco-eficiencia del hormigón señaladas por Gursel [8] son: reducción del factor de clinker, optimización de los procesos más significativos con el fin de reducir su intensidad energética, minimización de las cargas por transporte (por reducción de distancias o cambio de modalidad), y cambio de la matriz energética hacia fuentes renovables. Esto coincide con el estudio de Dossche et al [23], donde se hace un análisis de impacto mediante el denominado Eco-indicador 99 y se determina para el caso particular de hormigón armado fabricado con la provisión de una planta elaboradora (ubicada en Bélgica) un eco-impacto de los agregados del 6%, sensiblemente por debajo del 29% para el acero de refuerzo, el 27% para el contenido de cemento, y el 20% para el transporte (incluyendo

solamente el correspondiente al hormigón fresco de la planta a la obra). De esta forma, el factor de clínker y el transporte se presentan en primera instancia como factores a poner en relieve.

Cabe destacar la ausencia en las consideraciones de Gursel [8] de estrategias de reúso y reciclado, ya sea como manejo del fin de vida (FdV) usándolo como sub base y sumidero de carbono o como agregados gruesos reciclados (AGR) para elaborar hormigones con agregados reciclados (HAR). Especialmente esta última estrategia es solo favorecida cuando los agregados son obtenidos mediante una demolición selectiva que permita separar el hormigón de los residuos de la construcción y demolición (RCD). Para un manejo integral, todas estas estrategias deben ser tenidas en cuenta en función de su complementariedad, ya que pueden, además de conseguir una reducción de los impactos de ciclo de vida más referidos como el potencial de calentamiento global, reducir o eliminar otros impactos como el agotamiento de recursos no renovables, la transformación del territorio, la emisión de material particulado, y otras cargas asociadas a los distintos tipos de minería extractiva.

Visintin et al. [12] realizaron un estudio a gran escala, de 624 dosificaciones extraídas de 61 estudios sobre HAR, entre los cuales se encuentra un trabajo de Zega y Di Maio [24], del Área de Tecnología del Hormigón del LEMIT. Para realizar los cálculos de ACV de las dosificaciones, los autores tomaron como base para su modelo, la herramienta para realizar ACV de hormigones de Gursel, llamada Green Concrete LCA Tool, desarrollado por la autora en su tesis doctoral de la universidad de Berkeley, California. A este modelo, que como se mencionó no incorpora el reciclado, se le agregaron los datos extraídos de la planta de reciclado utilizada en el estudio de Ghanbari [10], creando su propio modelo de cálculo. Cabe señalar que, tal como reconocen los autores, el estudio solo toma en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub>eq.

Con respecto a la asignación de las cargas del

reciclado, Visintin et al. [12] plantean que lo indicado recientemente por varios autores como Zhang et al. [25] y Cuenca Moyano et al. [26] sobre particionar las cargas ambientales del reciclado entre el hormigón original (ya que forma parte del manejo de su fin de vida) y el hormigón reciclado, es correcto pero difícil de implementar. Esto se debe a la dificultad que presenta determinar en qué proporción hacerlo, porque las características del AGR son inferiores a las del AGN, por lo que habría que ajustar la asignación de cargas con un criterio cualitativo. Esto fue resuelto anteriormente por Marinković [11] por medio de una regla de asignación por corte, por el mismo motivo. Los autores descartan la necesidad de particionar las cargas, mediante un análisis de sensibilidad estadístico sobre los dos modos, comprobando que el particionado de las cargas de reciclado genera una incidencia de magnitud despreciable. Vale aclarar que este criterio solo alude a la emisión de CO<sub>2</sub>eq y el potencial de calentamiento global, y que en otras categorías de impacto las magnitudes podrían variar, justificando el particionado, por esto es necesario verificar este criterio según cada categoría.

En cuanto a la emisión de CO<sub>2</sub>eq, tal como señalan Visintin et al. [12] en su análisis de sensibilidad estadístico entre los distintos procesos que involucra la producción de hormigón, la producción de AGR tiene una incidencia similar a la de AGN, y es un orden de magnitud menor que la incidencia del cemento, por lo que no se obtienen importantes mejoras en lo que respecta a CO<sub>2</sub>eq con su implementación sobre los agregados naturales. Por este motivo, es relevante enfatizar la ausencia en los estudios de ACV de hormigones reciclados revisados, de los impactos de agotamiento de recursos no renovables, de transformación del territorio, y de emisión de material particulado, entre otros, asociados a la minería extractiva y los vertederos, máxime, cuando son las principales mejoras que supone el uso de AGR. Por otra parte, es importante tener en cuenta que este análisis de Visintin et al. considera principalmente el procedimiento de trituración y

fraccionamiento en la producción del agregado. En el AMBA, la incidencia del transporte es sumamente significativa (por la gran distancia desde la fuente del AGN) y por lo tanto diferente a la que puede encontrarse en la mayoría de la literatura. Sobre este aspecto y sus potenciales beneficios a partir de la implementación de un circuito de producción de agregados reciclados provenientes de RCD resulta un punto de sumo interés para la consideración de los condicionantes locales en el AMBA.

Visintin et al. [12] no tuvieron alternativa de transporte al camión, debido a las condiciones de la región de Australia para la que fue realizado el estudio. En el caso de nuestra región, el AMBA, contamos con la alternativa del tren para transportar los agregados gruesos y el cemento desde Olavarría al AMBA. Se puede hacer un cambio modal o multimodal, combinando ambos medios. Esto tiene la potencialidad de reducir el impacto del transporte, ya que actualmente, la mayoría de las hormigoneras (con varios ejemplos en La Plata) transportan la totalidad de los materiales en camiones que vuelven a Olavarría vacíos, redundando en cargas ambientales considerables, dados los 660 km de ida y vuelta por viaje de 30 t de las bateas. Una alternativa interesante sería la construcción de un centro de transferencia intermodal regional, estratégicamente ubicado en La Plata, con el fin de abastecer a las hormigoneras del Gran La Plata, con el material traído en tren de carga, acopiado y cargado en camiones con bateas que reducirían sus trayectos a la escala local. Para esto sería necesario intensificar la frecuencia de los viajes y realizar la inversión en una rampa para poder cargar las bateas con una pala normal, disponer de una pala especial que permita cargar las bateas, o equipamiento como una cinta transportadora, silos, tolvas para cargar las bateas. De esta manera se reduciría la emisión de GEI dada por el transporte considerablemente. Por lo tanto, el análisis de la aplicación de agregados reciclados no conviene que sea hecho en forma aislada sino integrado en estudios comparativos con la implementación de otros procedimientos y

tecnologías competitivas.

### **Producción de Sistemas Estructurales con Hormigón Reciclado**

El ACV no debe quedar limitado a los aspectos del material. Se requiere mayor profundidad respecto a cómo los diferentes materiales permiten o dificultan la implementación de una economía circular. Los materiales cementicios se encuentran entre los más inconvenientes en estos aspectos. Cuando se los compara con estructuras de madera o de acero, e incluso mampostería, la baja reusabilidad de las estructuras monolíticas de hormigón armado es una deficiencia significativa [27]. Junto con mejoras en la eco-eficiencia del material deben también diseñarse mejoras en el diseño estructural, que habiliten su desmontaje, reúso y transformación, para evitar la obsolescencia anticipada de estructuras que tengan vida útil remanente. De este modo, se asegura la eficacia de la principal estrategia de eco-eficiencia que se plantea para las estructuras de hormigón, cuando es aplicado en estructuras edilicias. En este aspecto es importante verificar la compatibilidad del desempeño de elementos de HAR con elementos reusables.

Al nivel del sistema estructural, según De Wolf [9], las principales estrategias para disminuir el contenido de carbono incorporado son el uso de materiales de bajo coeficiente de carbono incorporado (CCI) y baja cantidad de material estructural (CME) por unidad de superficie edificada. En el caso de las estructuras de hormigón, esto se logra abordando las estrategias mencionadas al nivel del material, y el complemento del resto de los sistemas edilicios de características livianas y eco-eficientes, junto con el reúso de componentes de sistemas desmontables. Cabe destacar que con este enfoque la investigación pasa a tomar una visión multi-escalar, abarcando las mejoras en la producción del material, y sumando los recursos disponibles en la escala del sistema estructural y el edificio. Este abordaje incorpora, además de las mejoras antedichas, el reúso y reciclado. En cuanto

al reciclado, abarca la gestión de los residuos propios de la industria del hormigón (como el hormigón de corte, agua de limpieza) y los residuos de la industria de la construcción (RCD) como el hormigón demolido selectivamente y reciclado. Con respecto al reúso, al incorporar el diseño estructural dentro de la estrategia de optimización del manejo del ciclo de vida del hormigón, se plantea la necesidad de desarrollar sistemas estructurales desmontables como estrategia óptima de manejo de fin de uso. La complejidad del análisis requiere basarse primordialmente en estudios de caso, y a partir de los mismos parece posible definir guías de acción que puedan aportar una visión general. En la literatura existen guías de este tipo, pero es inconveniente su aplicación directa al contexto local debido a las diferencias en la matriz productiva y diversos condicionantes locales, ya sea técnicos, económicos o sociales.

## DISCUSIÓN

Aunque es necesaria más información respecto a las condiciones locales, la literatura internacional sienta bases sólidas para realizar ACV en el contexto local. De Gursel y de De Wolf se extrae la necesidad de profundizar en herramientas de ACV para cálculos detallados, que contengan datos obtenidos de fuentes públicas. De Ghanbari et al. se extrae el modelo de planta fija de reciclado que puede ser adaptado a la maquinaria de fabricación nacional disponible para realizar un prototipo de planta de reciclado de hormigón para realizar estudios de ACV consistentes con las características locales.

Como se puede observar en los estudios de ACV de HAR revisados, es necesario contar con más detalle y además es deseable que sean más abarcativos en cuanto a las categorías de impacto que incluyen. En cuanto a la aplicación de los datos obtenidos en dichos estudios, es necesario realizar mediciones para obtener datos primarios y adaptar los inventarios a condiciones locales. En cuanto a características tecnológicas de los procesos, por mencionar un ejemplo, en

los estudios de referencia se plantea una planta estacionaria con control de polvo, y en Argentina por el momento no existe ninguna planta que tenga control de polvo, y de hecho en las experiencias de producción de AGR a escala industrial se registran problemas precisamente por la emisión de material particulado en las inmediaciones. No obstante lo antedicho, y tal como hemos planteado, se pueden tomar referencias de los análisis de sensibilidad (incidencia) de los distintos procesos según cada categoría de impacto para evaluar en qué procesos hacer foco para la mejora de la calidad de los datos, por medio de la obtención de datos primarios, que den mayor consistencia o representatividad local a los estudios.

La importancia de la incidencia del transporte, que depende actualmente en cualquiera de sus modos de los combustibles fósiles, hace que la localización de los recursos y procesos, como son, entre otros, la obtención de los agregados y la producción del hormigón, sea determinante en la eco-eficiencia del material. Para cada escenario de reciclado planteado en la Figura 1, se deben tener en cuenta los emplazamientos y los transportes asociados, en combinación con los demás factores que generan las cargas ambientales. Para determinar los caminos más convenientes para la mejora de la eco-eficiencia del hormigón elaborado en el ámbito bonaerense, se deben realizar análisis de sensibilidad por categoría de impacto, para luego poder establecer lineamientos para mejoras estratégicas.

En el contexto de la creciente preocupación internacional por el calentamiento global y el compromiso argentino con el cumplimiento del objetivo de reducción de emisión de GEI (del 18% + 19%, incondicional + condicionado a asistencia financiera, respectivamente, para el 2030 con base a emisiones de 2005) [28], es importante restringir cualquier estrategia que implique un mayor uso de cemento, dado que es el proceso que mayores emisiones de GEI genera de los constituyentes del hormigón. Es así que se hace necesario realizar un análisis integral de la estrategia de uso de

AGR, para evitar potenciales contrapartidas como la necesidad de un mayor uso de cemento. Cabe mencionar la relevancia que tiene para la implementación generalizada del reciclado por trituración del hormigón endurecido, la demolición selectiva de las estructuras y la subsiguiente gestión de RCD diferenciados. En caso contrario, el hormigón será triturado junto a otros materiales como la mampostería en la fracción general de RCD, constituyendo un infra reciclaje evitable. La aplicación de AGR no debe realizarse sin estar integrada en un análisis integral de impacto.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo incluye bibliografía internacional disponible sobre la temática del análisis de ciclo de vida de estructuras con hormigón con agregados reciclados. Todos los estudios disponibles contienen datos específicamente situados, y por lo tanto, se pueden extraer conclusiones parciales, ya que dimensiones como la matriz energética o la matriz de combustibles (por ejemplo los usados en el horno de clínker), las distancias de transporte, los tipos de cantera, deben ser ajustadas a las características propias de nuestro país o región en estudios futuros. Esta información no se encuentra disponible a nivel local y es un aspecto de suma relevancia respecto a la implementación de políticas eco-eficientes en la construcción con hormigón.

Este abordaje propone también el fomento de las

estrategias de reúso y reciclado, con el objetivo primordial de resolver problemas de gestión de residuos, y reducir el consumo de recursos no renovables. Estrategias de este tipo resultan sostenibles siempre que, además de técnicamente viables, permitan la asociación del desarrollo económico y humano. Como conclusión principal se extrae que es necesario tener una estrategia propiamente local de fomento del reúso y reciclado del hormigón, que aparte de fundarse en la agenda del calentamiento global, se base en las condiciones y necesidades particulares de nuestro país y región. Para ello es necesario la recopilación de información detallada del sistema productivo nacional en el circuito de la vida útil de las estructuras de hormigón armado.

## Agradecimientos

Este trabajo es parte de las investigaciones del PICT 0091-2017, financiado por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación. Lucio Maselli agradece a la Agencia por el financiamiento, y al LEMIT-CICPBA por el entorno de trabajo. Asimismo, es muy apreciado el conocimiento compartido por Eva Sosa del LEMAC-UTN FRLP (respecto a la gestión de RCD y reciclado de hormigón), y por Quinto Gebert, Darío Campos, Ariel González, Sofía de Abreu, Leonardo Rozze y Pablo Carreño (en función de su experiencia desde la industria) y a Susana Héctor de Vialidad de Provincia de Buenos Aires.

## REFERENCIAS

- 1.- ISO, ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines Management. Ginebra: ISO, 2006.
- 2.- IRAM, Norma IRAM 1531:2015. Buenos Aires, 2015.
- 3.- CIRSOC, Reglamento CIRSOC 201:2005. Buenos Aires: INTI, 2005.
- 4.- «Red Argentina de Ciclo de Vida». [En línea]. Disponible en: <https://analisisciclodevida.wixsite.com/>. [Accedido: 18-nov-2020].

- 5.- Green Delta, «Open LCA 1.10.2». Berlín, 2019.
- 6.- S. B. Marinković, «Life cycle assessment (LCA) aspects of concrete», en *Eco-Efficient Concrete*, V M John, Fernando Pacheco-Torgal, S Jalali, y Joao Labrincha, Eds. Woodhead Publishing, 2013, pp. 45-80.
- 7.- «ecoinvent 3.6». ecoinvent, Zúrich, 2019.
- 8.- P. Gursel, «Life-Cycle Assessment of Concrete: Decision-Support Tool and Case Study Application», UC Berkeley, 2014.
- 9.- C. De Wolf, «Low Carbon Pathways for Structural Design: Embodied Life Cycle Impacts of Building Structures», Massachusetts Institute of Technology, 2017.
- 10.- M. Ghanbari, A. M. Abbasi, y M. Ravanshadnia, «Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions», *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 20, n.o 2, pp. 810-822, 2018, doi: 10.1007/s10163-017-0640-2.
- 11.- S. B. Marinković, I. Ignjatović, y V. Radonjanin, «Life-cycle assessment (LCA) of concrete with recycled aggregates (RAs)», en *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, F. Pacheco-Torgal y Y. Ding, Eds. Woodhead Publishing, 2013, pp. 569-604.
- 12.- P. Visintin, T. Xie, y B. Bennett, «A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake», *J. Clean. Prod.*, vol. 248, n.o November, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119243.
- 13.- L. Maselli, E. Sosa, C. Pico, Y. A. Villagrán Zaccardi, y G. San Juan, «Optimización del ciclo de vida de estructuras de hormigón a través del diseño para el desmontaje», en *Memorias del IX Congreso Internacional y 23a Reunión Técnica AATH*, 2020, pp. 351-358.
- 14.- P. Crowther, «A Taxonomy of Construction Material Reuse and Recycling: Designing for Future Disassembly», *Eur. J. Sustain. Dev.*, vol. 7, n.o 3, pp. 355-363, 2018, doi: 10.14207/ejsd.2018.v7n3p355.
- 15.- V. Prieto Sandoval, M. Jaca García, y M. Ormazabal, «Economía circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación», *Mem. Investig. en Ing.*, vol. 15, n.o 15, pp. 85-95, 2017.
- 16.- Q. F. Gebert, «Utilización de agregados reciclados a escala industrial: evolución y aprendizaje de 8 años en el hormigón elaborado», en *Memorias del Workshop sobre gestión de residuos de construcción y demolición*, 2019, pp. 210-252.
- 17.- MAPEI, «Environmental product declaration in accordance with ISO 14025 for Re-Con Zero Evo», EPD International AB EPD, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/13777/epd1105\\_Mapei\\_Re-Con Zero Evo\\_2018.pdf](https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/13777/epd1105_Mapei_Re-Con Zero Evo_2018.pdf). [Accedido: 15-nov-2020].

- 18.- AAHE, «AAHE - Producción Anual Empresas Hormigoneras Asociadas 2015-2019», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hormigonelaborado.com/wp-content/uploads/2020/06/Producción-2019.pdf>. [Accedido: 26-sep-2020].
- 19.- ACI Committee 555, «Removal and Reuse of Hardened Concrete - ACI 555-01», Michigan, 2001.
- 20.- C. J. Zega y Y. Casuccio, «Evaluación de testigos de pavimento elaborado con hormigón reciclado», *Cienc. y Tecnol. del Hormigón*, n.o 13, pp. 45-50, 2006.
- 21.- International Energy Agency, «Key energy statistics, Electricity generation by source, Iran», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/countries/iran>. [Accedido: 19-ago-2020].
- 22.- A. Secretaría de Energía, «Informe Estadístico del Sector Eléctrico 2016, Archivo complementario C1.GEN\_POT\_COMB\_2016», 2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion\\_del\\_mercado/publicaciones/mercado\\_electrico/anuarios\\_electrica/2016/2016.zip](http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/mercado_electrico/anuarios_electrica/2016/2016.zip). [Accedido: 19-ago-2020].
- 23.- C. Dossche, V. Boel, W. De Corte, P. Van den Heede, y N. De Belie, «A plant based LCA of high-strength prestressed concrete elements and the assessment of a practical ecological variant», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 192-202, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.07.011.
- 24.- C. J. Zega y A. A. Di Maio, «Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, n.o 3, pp. 281-286, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000165.
- 25.- Y. Zhang, W. Luo, J. Wang, Y. Wang, Y. Xu, y J. Xiao, «A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 115-125, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078.
- 26.- G. M. Cuenca-Moyano, S. Zanni, A. Bonoli, y I. Valverde-Palacios, «Development of the life cycle inventory of masonry mortar made of natural and recycled aggregates», *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1272-1286, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.029.
- 27.- Wrap, *Recyclability efficiency metric*. Oxford: WRAP, 2008.
- 28.- «República Argentina, First Revision of its Nationally Determined Contribution, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático». [En línea]. Disponible en: [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Argentina First/Traducción NDC\\_Argentina.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Argentina%20First/Traducción%20NDC%20Argentina.pdf). [Accedido: 18-nov-2020].