

HACIA LA OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO PARA EL DESMONTAJE

Lucio Maselli^{1,2}, Eva Sosa^{3,4}, Carlos Pico^{1,4}, Yury Villagrán^{1,4,6}, Gustavo San Juan^{4,5}

1 LEMIT, La Plata, Argentina, hormigones@lemit.gov.ar

2 ANPCyT, CABA, Argentina, lucio.maselli@cyt.cic.gba.gob.ar

3 UTN-FRLP, Berisso, Argentina, mesosa@frlp.utn.edu.ar

4 CONICET, La Plata, Argentina

5 IIPAC-UNLP, La Plata, Argentina, iipac@fau.unlp.edu.ar

6 Magnel Vandenpitte Lab, Ghent University, Gante, Bélgica

RESUMEN

El diseño para el desmontaje (DpD) es una metodología de diseño que, basándose en el pensamiento de ciclo de vida, toma en cuenta la construcción y la deconstrucción de un producto. El desmontaje permite el reúso. La noción de fin de vida es precedida por ciclos de uso y fin de uso. En este trabajo se analiza su aplicación a estructuras de hormigón y se señalan las principales ventajas, potencialidades y dificultades. Se revisan los principales aspectos de diseño a tener en cuenta. Se plantea la necesidad futura de obtener información cuantitativa sobre los procesos de producción de los materiales constituyentes del hormigón, y de los potenciales procesos de desarmado, reúso y transformación, para confeccionar inventarios de ciclo de vida adaptando las bases de datos existentes y de esa manera poder realizar análisis de ciclo de vida (ACV) de acuerdo a las condiciones locales.

Palabras claves: diseño para el desmontaje, hormigón eco-eficiente, ciclo de vida, economía circular

REÚSO Y RECICLADO EN LA CONSTRUCCIÓN

El desmontaje es acreditado como el escenario de fin de vida más ecológicamente deseable, y es ubicado en los distintos modelos de jerarquía de residuos como la opción de mayor grado, ya que posibilita todas las estrategias de recuperación de recursos y de evasión de cargas ambientales asociadas de un determinado producto. Esta estrategia fue implementada con éxito por la industria manufacturera, pero no así en el caso de la construcción, principalmente por su característica tradición de elaboración a medida.

Si bien existe en el ámbito europeo mención a la jerarquía del tratamiento de residuos desde 1979, solo en 2008 con la Directiva 2008/98/ce [1] del Parlamento Europeo, la misma adquirió estatus legal. Más recientemente, en 2016, la Unión Europea estableció que los residuos de construcción y demolición (RCD) se clasifican como residuos de flujo prioritario, debido a la capacidad de los mismos de recuperar su valor. La reutilización de los elementos constructivos se constituye así en una de las prácticas más sustentables para la industria de la construcción.

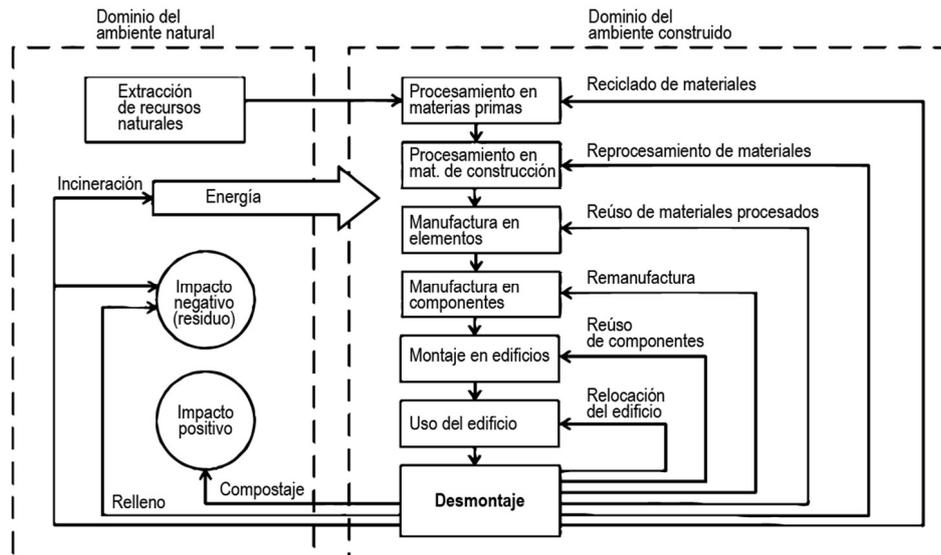


Figura 1: Escenarios de reuso y reciclado en la construcción (Adaptado de [2]).

Para facilitar la implementación de estrategias de reuso y reciclado en la industria de la construcción, Crowther [2], realizó un modelo de 9 niveles jerárquicos (Figura 1) con base en la bibliografía existente sobre reciclado y recuperación de residuos. Por su parte, Iacovidou et al. [3], plantean que se están desarrollando estrategias de diseño que promueven el reuso. Dichas intervenciones son el reuso adaptativo, el diseño para el desmontaje, el diseño para la reutilización, el diseño para la manufactura y el ensamblado.

El objetivo de este trabajo es realizar una síntesis de las estrategias disponibles para mejorar el ciclo de vida del hormigón. Para ello se abordará especialmente el empleo de agregados gruesos reciclados y el reuso de componentes (bases, columnas, vigas, etc.) de un sistema estructural independiente y desmontable, tipo esqueleto, realizado en hormigones reciclados teniendo en cuenta las particularidades del contexto local. Este trabajo involucra investigaciones preliminares sobre el impacto del ciclo de vida de hormigones elaborados con agregados reciclados (HAR), en base a estudios previos del LEMIT [4,5]. En estudios futuros se proyecta realizar un caso de estudio de un prototipo de sistema estructural desmontable usando HAR y realizar estudios de ACV a nivel del material y sistema.

IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN LAS ESCALAS DEL MATERIAL, DEL SISTEMA ESTRUCTURAL Y DE LOS EDIFICIOS

A nivel global, en 2019 se produjeron aproximadamente 4,1 Gt de cemento [6] y más de 25 Gt de hormigón, lo que equivale a 3,8 t o 1,5 m³ por persona por año. Esto convierte al hormigón en el material de origen humano más utilizado en el mundo [7]. Su producción mundial emite aproximadamente 2,1 Gt de CO₂, el 5-8% del CO₂ antropogénico mundial, en su mayoría atribuido a la producción de Clinker, ya que mitad de las emisiones de CO₂ se liberan en el calcinamiento de la piedra caliza, y la otra mitad a los combustibles empleados en los hornos de Clinker y en las plantas de generación eléctrica que abastecen los procesos. La producción de cemento emite CO₂ a razón de 600 kg/t de cemento, y la producción de Clinker consume 3,5 MJ/kg. Asumiendo un contenido de Clinker de 300 kg/m³ de hormigón nuevo, la producción de 1m³ de hormigón demanda 1,05 GJ/m³ de hormigón y emite 180 kg de CO₂. El mezclado de hormigón consume 8 MJ/m³, la demolición de hormigón 275 MJ/t y la trituración de hormigón 85 MJ/t. [8]. A nivel mundial se producen 3 Gt por año de RCD, de los cuales, un porcentaje que varía entre un 20 y un 80% según el país, corresponde a hormigón de demolición [9].

Hormigón reciclado

A partir de los niveles de producción y cargas ambientales asociadas al hormigón, y desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, es imperioso pensar en alternativas que armonicen su ciclo de vida completo, aguas arriba sus materiales constituyentes y aguas abajo los componentes de la estructura, el edificio, la ciudad. Esto implica abordar los distintos niveles de reciclado y reúso planteados en el esquema de Crowther [2].

Ghanbari et al. [10] analizaron la producción de agregados gruesos naturales (AGN) y agregados gruesos reciclados (AGR), recomendando un reemplazo máximo de 50 % de AGN por AGR como escenario óptimo, ya que se aprovechan las ventajas de cada tipo de agregado, logrando en un período de 20 años, una reducción de aproximadamente 30 % de energía y carbono. Visintin et al. [11] realizaron el ACV de 624 dosificaciones de trabajos sobre HAR y obtuvieron que hasta 45 MPa no generan cargas adicionales a los realizados con AGN, y que utilizar el hormigón de deshecho como sumidero de carbono (usando parte en HAR y el resto como sub base o vertido) puede compensar entre 40 y 55 % de las emisiones de CO_{2eq} generadas en la fase de manufactura.

Aún así pueden pensarse prácticas más eco-eficientes aún que el uso de agregados reciclados. Resulta difícil mejorar la performance ambiental de los procesos asociados al cemento y las demás materias primas constituyentes del hormigón, más aún si se abordan otros impactos ambientales directos e indirectos, como la transformación del hábitat, material particulado, acidificación, eutrofización, entre otros. Esto se debe a la naturaleza extractiva, destructiva y de gran intensidad energética de la producción del cemento y el hormigón. Por ello, resulta conveniente evitar su demolición y trituración, pasando a un esquema de reúso de componentes y sistemas, preservando las cargas incorporadas y evitando las solicitaciones ambientales que supone repetir dichos procesos.

Impactos del ciclo de vida de los sistemas estructurales

Para analizar el ciclo de vida del hormigón es necesario situarlo en un contexto constructivo particular, ya que de él dependerán las fases de construcción, uso, mantenimiento, fin de uso y fin de vida (FdV). El FdV de una estructura fija normalmente implica su demolición y vertido, y es habitual que estas estructuras alcancen su FdV de manera prematura con respecto a su durabilidad de diseño. Este proceso es caracterizado por Durmisevic [12] como desproporción incorporada de ciclos de vida técnico (durabilidad) y funcional (uso). Es por este motivo que la capacidad de transformación de las estructuras contribuye a la optimización de su ciclo de vida. Para lograrlo los componentes de los sistemas tienen que ser desmontables e intercambiables.

De los estudios revisados por Brocklesby [13] sobre el impacto ambiental de las estructuras, se extrae para esqueletos de hormigón prefabricado un 25-30% sobre el total de la energía incorporada (EI) (energía utilizada en las fases de materiales, manufactura y construcción) en esos edificios. De Wolf [14] plantea que para obtener estructuras de bajo contenido de carbono se deben utilizar materiales de bajo coeficiente de carbono incorporado (CCI) y reducir la cantidad de material estructural (CME). Siguiendo estas recomendaciones el reemplazo de un 50 % de AGN por AGR en hormigones de hasta 45 MPa de resistencia puede aportar una reducción del CCI [8, 9]. Los sistemas de luces de hasta 4m y de alturas hasta 5 niveles son los que menor CCI y CME conllevan [14]. Para favorecer estos objetivos resulta beneficioso asociar a una estructura eco eficiente el resto de los sistemas edilicios desmontables y livianos.

Con la utilización de elementos de hormigón prefabricado se sube un nivel, y con la utilización de un componente integrando un sistema estructural se suben dos niveles en el esquema de Crowther [2] con respecto a la producción de HAR. Que estos elementos y

componentes sean diseñados para ser desmontables, posibilita su reuso y permite reiniciar el ciclo en los mismos niveles, sin recaer en infra reciclaje. Más aún, se habilita el reuso de los componentes del sistema en otra configuración o a rearmar el sistema completo en otra locación, adaptándolo a varios escenarios previstos o nuevas necesidades inciertas, y evitando los impactos del vertido, demolición, reciclado, reprocesamiento, extracción de recursos naturales y manufactura de materiales y componentes.

Impactos del ciclo de vida de los edificios

Los edificios son responsables del 40 % del consumo de materias primas, del 30-40 % de uso de energía primaria; en algunos países hasta el 75 % de la energía eléctrica [7] y del 40-50% de los gases de efecto invernadero (GEI) [15]. Según la revisión de ACV de edificios de Gursel [7], de la energía utilizada en el ciclo de vida de un edificio comercial típico, la EI inicial (fases de materiales, manufactura y construcción) representa aproximadamente un 10 % del total, la EI recurrente (fases de refacción y mantenimiento) un 5 %, mientras que la energía operativa (EO) es un 80-85 %, y la energía de demolición el 2 %. Cabe señalar que las fases de demolición, reciclaje, reuso y disposición final, es decir, de FdV y FdU son las menos estudiadas en los ACV de edificios, registrándose en el último año algunos estudios limitados en su alcance que comienzan a discutir cómo distribuir las cargas entre las distintas fases de uso y reuso.

Si bien otros autores [15,16] coinciden en que un edificio convencional tiene 80-90 % EO vs. 10-20 % de EI, la diferencia entre EI y EO se reduce conforme el avance en la legislación sobre eficiencia energética y en la tecnología de las envolventes e instalaciones hacia sistemas pasivos. Para ilustrarlo, Densley Tingley et al. [16] plantean ejemplos de edificios de mayor eficiencia, como galpones de almacenamiento, donde la EO es baja y la EI llega al 60 % del total, y aún en oficinas donde la EO es intensiva, el carbono incorporado puede llegar al 45 %. Estas mejoras favorecen el incremento de la incidencia que la tecnología del hormigón puede otorgar a la eco-eficiencia de un edificio, por eso es relevante integrar a las líneas de trabajo de tecnología del hormigón, abordajes multi escalares, aguas arriba y aguas abajo, del foco de estudio.

ESTRUCTURAS DESMONTABLES, REUSABLES Y TRANSFORMABLES DE HORMIGÓN: ASPECTOS CRÍTICOS PARA SU USO GENERALIZADO

En 1976, Reinhardt [17] planteó la necesidad polifuncional de los edificios y la posibilidad de construir sistemas desmontables de hormigón. En las décadas siguientes se desarrollaron 5 sistemas desmontables en los Países Bajos. Por deficiencias en su diseño (como juntas tomadas con grout) y un uso inadecuado, se impidió su desmontaje generalizado. En los casos en que el sistema estaba correctamente diseñado, se generaron problemas debido a un manejo no integral de la cadena de suministros por falta de información y comunicación de contratistas y clientes. Que el sistema sea físicamente desmontable no garantiza que vaya a desmontarse en el futuro, ya que para lograrlo es necesario organizar la cadena de suministro de todo el ciclo de vida de los edificios [18]. Según los lineamientos de Crowther [19] para DpD, a continuación se presenta una serie de temas y recursos específicos para viabilizar el reuso masivo de estructuras de hormigón:

Uniones reversibles

Las uniones entre componentes son el punto crítico de los sistemas estructurales desmontables, ya que deben tener rigidez y permitir una futura desvinculación. Pueden ser secas por medio de uniones metálicas abulonadas, o húmedas llevando una porción de hormigón colado *in situ* en la unión. Aninthaneni y Dhakal [20] desarrollaron a nivel conceptual un caso de estudio genérico de sistema estructural sismo-resistente de hormigón prefabricado desmontable por medio de uniones secas, poniendo en valor la

ventaja de poder cambiar los componentes dañados por un eventual sismo, sin demoler. En este caso, las uniones se resolvieron mediante el uso de complementos metálicos, lo que supone un tema a tener en cuenta para la durabilidad de las estructuras. Xiao et al. [21] experimentaron el diseño y pruebas de resistencia mecánica de uniones reversibles, en hormigón nuevo y HAR, compuestas por un encastre y parte de las armaduras expuestas para poder vincularlas y luego llenarlas *in situ*. Al momento del FdU se debe demoler esa porción colada *in situ*, para descubrir las armaduras y poder separarlas, permitiendo el izado y desmontaje de la viga. Los resultados de esta investigación, si bien no apuntaron a reusar las piezas sino a verificar su resistencia mecánica en comparación con uniones monolíticas, demostraron una performance similar entre los dos tipos de uniones. Es necesario experimentar uniones entre distintas piezas y probar su reúso para verificar la consistencia del diseño en sucesivos ciclos de uso.

Cadena de suministro optimizada para el reúso

Diversos métodos se han desarrollado para determinar, optimizar y planificar el desarmado de estructuras, siendo el más evolucionado el DNA (Disassembly Network Analysis). Éste aplica análisis de redes, lo cual permite elegir el camino óptimo de desmontaje según tiempo y residuos generados [22]. Es importante concebir un desmontaje paralelo en lugar de uno secuencial, y minimizar las interdependencias entre sistemas. Para lograr una planificación que asegure la factibilidad en tiempo y forma, y asociados al modelo BIM (Building Information Modelling), que es básicamente un modelo 3D con definición constructiva e información incorporada, puede realizarse un modelo 4D agregando la dimensión temporal, y 5D sumando la dimensión financiera. Esto permite simular planes y poder acceder a un punto temporal específico para abordar problemas puntuales que puedan darse en el transcurso de las tareas.

Para tener una base de datos fiable, estable y continua del componente prefabricado a lo largo de los ciclos de uso, se debe realizar la identificación de cada pieza mediante un etiquetado indeleble, que tenga igual vida útil que la pieza a etiquetar. Ikonen et al. [23] comparan las tecnologías disponibles de etiquetado adecuadas para su uso en piezas de hormigón, priorizando la tecnología RFID (identificación por radio), en la que una etiqueta pasiva (sin alimentación eléctrica) puede ser insertada en el hormigón y contener la identificación e información del ciclo de vida actualizable.

Para lograr un manejo integral del ciclo de vida de las estructuras reusables es necesario realizar un control de calidad luego de los ciclos de uso e incorporar dicha información al etiquetado. Iacovidou et al. [3] plantean las distintas fases del reúso de componentes (Fig. 2), a saber: uso, FdU, recuperación, control de calidad, redistribución y reúso en caso satisfactorio o Manejo del FdV en caso contrario. Para efectivizar la redistribución es necesario que los diseñadores cuenten con una base de datos en línea, que contenga la información escaneada de las etiquetas RFID de las piezas disponibles a los efectos de diseñar con sus características precisas, importándolas en el modelo BIM, a los fines de hacer más consistente la planificación y manejo de las etapas que involucran a dicha pieza. Cheng y Chang [24] proponen un modelo estructural de manejo del etiquetado RFID y su integración al esquema de edificio abierto, contemplando las distintas fases del reúso.

Diseño para el desmontaje en estudios de ACV

Las intervenciones de DpD están siendo analizadas mediante ACV, por un lado frente a nuevos edificios realizados con configuraciones fijas con supra reciclaje [25,26], y por el otro para la renovación y mejora de edificios existentes [27]. La principal discusión es el criterio de asignación de las cargas para cada ciclo de uso. La norma ISO 14044 [28] plantea que las cargas deben distribuirse entre los ciclos de uso con un método de asignación de cargas que puede ser por truncamiento, características físicas, o valor

económico. Es un planteo abierto y los distintos países definen precisiones, al respecto Densley Tingley et al. [16] repasan distintos abordajes. Por ejemplo, las normas europeas EN plantean que los beneficios del DpD se computan solo cuando el reúso se hace efectivo. Esto ha motivado a que autores como Rasmussen et al. [26], comparen un edificio con supra reciclaje (acondicionamiento de contenedores marítimos) contra un edificio con estructura de hormigón reusable, y planteen que no es tan conveniente el uso de DpD para los elementos de prolongada vida útil como las estructuras de hormigón. Ello se debe a que sus créditos de reducción de cargas ambientales se verificarían recién en el primer ciclo de reúso. En dicho estudio se adoptan 120 años, cuando debería corresponder a un ciclo de uso de 20 a 50 años, acorde a los ciclos de uso estadísticos y las normativas estructurales. Por lo antedicho resulta importante dar la discusión en el contexto argentino para fomentar las estrategias de reúso y reciclado para el hormigón, ya que serán los pilares de un manejo óptimo de su ciclo de vida, y de una gestión sostenible de los recursos.

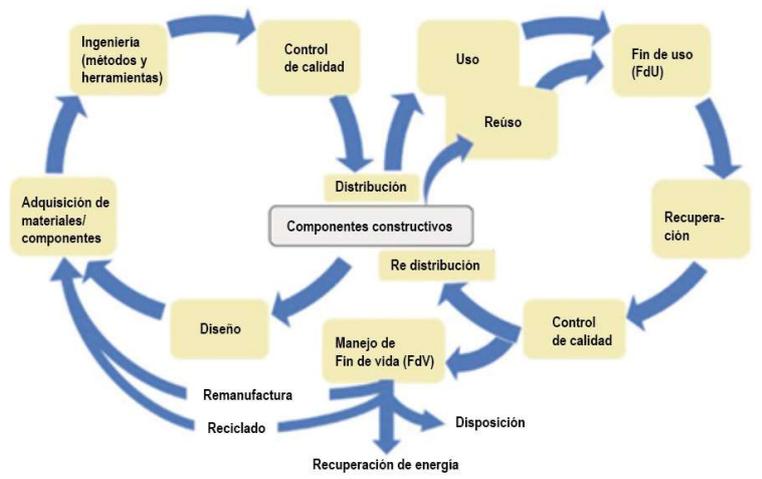


Figura 2: Ciclo de vida de elementos reusables (Adaptado de [3]).

ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN DESMONTABLES EN ARGENTINA

Aunque los centros de contaminación a escala global en general se encuentran alejados de nuestro país, las consecuencias del Cambio climático se observan a nivel global. Esta situación encuentra a la Argentina entre los países que menor responsabilidad y mayor dificultad tienen para afrontar los riesgos climáticos que se puedan originar [29]. Por este motivo es valioso revisar la experiencia de los países industrialmente desarrollados, y anticiparnos a problemas que el actual modo de producción genera. En estos países el fomento del DpD se centra en la prevención de residuos y reducción de consumos de recursos no renovables. Aunque estas condiciones no tienen igual peso en nuestra región, en zonas concentradas como el Área Metropolitana de Buenos Aires, es patente la disminución progresiva de agregados naturales idóneos (arenas gruesas y en un futuro cercano agregados gruesos) para la elaboración de hormigón. A su vez, existen potencialidades particulares para nuestro territorio; los centros urbanos nacionales se encuentran en constante expansión dispersa, y si bien los principales problemas son la falta y precariedad de viviendas e infraestructura, el desequilibrio territorial federal y las estructuras ociosas por re-funcionalizaciones territoriales o especulación inmobiliaria son problemas relevantes. Las estructuras desmontables permiten su redistribución territorial y la adaptación a escenarios adversos o inciertos como los antedichos, logrando el recupero y redirección del trabajo y capital invertidos en un contexto de escasez. Mediante una planificación que las considere, se pueden evitar rupturas del tejido productivo, favorecer situaciones que lo reproduzcan, y preservar recursos no renovables.

En relación a las condiciones del contexto local planteadas, es pertinente pensar alternativas más livianas que los sistemas europeos, que usan paneles de entepiso completos con módulos de medidas mínimas de 3,60m x 3,60m y hasta 3,60m x 7,20m. Esto les da gran velocidad de montaje (hasta 800 m² diarios), pero redundante en componentes relativamente pesados, que requieren para su montaje grandes plumas y equipamiento de izado. Un sistema de losetas o viguetas combinadas con paneles de otro material más liviano y eco-eficiente reduciría la CME y el CCI, a la vez que permitiría el manejo manual o con pequeños equipamientos, más accesible y con mayor carga de trabajo manual para ocupar a la mano de obra que pueda organizarse localmente en distintos puntos del territorio nacional.

De los sistemas comerciales de hormigón prefabricado relevados (Astori, SHAP, Tensar) ninguno aborda la fase de fin de vida en ninguna de sus tipologías. Se supone así que los fabricantes prevén la demolición de las estructuras. Como plantea Vandenbroucke [30], pueden incorporarse pequeños ajustes que hagan reversibles a sistemas estáticos preexistentes. Como contrapunto, el sistema científico-tecnológico nacional viene abordando el manejo de RCD y experiencias de ACV en importantes centros de investigación que deben integrarse en el eslabonamiento científico-tecnológico-productivo con los movimientos sociales para resolver el déficit de vivienda popular de un modo que genere fuentes de trabajo para las mayorías y hábitats de calidad a largo plazo.

CONCLUSIONES

El DpD habilita el reúso de las estructuras de hormigón y permite realizar cambios funcionales y simultáneamente explotar la vida de servicio máxima del material, que es una de sus principales virtudes. El desmontaje y reúso en el FdU y el reciclado en el FdV, son los manejos óptimos del ciclo de vida del hormigón. Las primeras iniciativas en Europa entre 1980 y 1990 tuvieron una participación exigua en el mercado debido a errores en su implementación. Se destacan, por un lado, la necesidad de mayor planificación de la deconstrucción y la cadena de suministro para el reúso, y por el otro, la vacancia y necesidad de estudios de ACV que contemplen el fin de vida de las estructuras y los edificios, para evitar una subestimación de su impacto ambiental y poder valorar más justamente las estrategias de reúso y reciclado.

En Argentina, la redistribución territorial que permitiría el reúso de estructuras desmontables tiene especial relevancia. Debe incrementarse la experiencia y legislación sobre reciclado y reúso en la construcción. Este aspecto local negativo es también un contexto más flexible para implementar prácticas superadoras a las experiencias de otros países. Teniendo en cuenta el déficit de 1,5 millones de viviendas nuevas, y 2,5 millones con mejoras, y que el estado nacional tiene un rol clave de planificación, el presente trabajo se plantea como una base para discutir estrategias y lograr reglamentaciones optimizadas respecto al ciclo de vida de las edificaciones y la calidad de vida de la población.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte de las investigaciones financiadas por la ANPCyT (PICT 2017-0091) Prest. BID. Lucio Maselli agradece el financiamiento como Becario ANPCyT.

REFERENCIAS

- [1] Diario Oficial de la Unión Europea, "Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.", *Parlam. Eur.*, vol. 22, (43 artículos), (2008), p. 28.
- [2] Crowther P, "A Taxonomy of Construction Material Reuse and Recycling: Designing for Future Disassembly", *Eur. J. Sustain. Dev.*, vol. 7, núm. 3, (2018), 355–363.

- [3] Iacovidou E, Purnell P, Lim M K, "The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution?", *J. Environ. Manage.*, vol. 216, (2018), 214–223.
- [4] Zega C J, "Propiedades Físico - Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados", (2010).
- [5] Santillán L.R, "Durabilidad de hormigones reciclados frente al ataque por sulfatos", (2020), 180p.
- [6] U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2020*, núm. 703, (2020).
- [7] Gursel P, "Life-Cycle Assessment of Concrete: Decision-Support Tool and Case Study Application", UC Berkeley, (2014).
- [8] Reinhardt HW, "Demountable concrete structures - an energy and material saving building concept", *Int. J. Sustain. Mater. Struct. Syst.*, vol. 1, núm. 1, (2012), p. 18.
- [9] Akhtar A, Sarmah AK, "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective", *J. Clean. Prod.*, vol. 186, (2018), 262–281.
- [10] Ghanbari M, Abbasi AM, Ravanshadnia M, "Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO2 emissions", *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 20, núm. 2, (2018), 810–822.
- [11] Visintin P, Xie T, Bennett B, "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, núm. November, (2020).
- [12] Durmisevic E, *Transformable building structures, Design for Disassembly as a way to introduce sustainable engineering to a building design and construction*, (2006).
- [13] Brocklesby M, "The Environmental Impact of Frame Materials", University of Sheffield, (1998).
- [14] De Wolf C, "Low Carbon Pathways for Structural Design: Embodied Life Cycle Impacts of Building Structures", Massachusetts Institute of Technology, (2017).
- [15] Ramesh T, Prakash R, Shukla KK, "Life cycle energy analysis of buildings: An overview", *Energy Build.*, vol. 42, núm. 10, (2010), 1592–1600.
- [16] Densley Tingley D, Davison B, "Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction", *Build. Environ.*, vol. 57, (2012), 387–395.
- [17] Reinhardt HW, "Demontable Betongebäude?", (1976), p. 23.
- [18] Dijk K van, Boedianto P, Kowalczyk A, "Chapter 6 State of the Art Deconstruction in the Netherlands", *Overv. Deconstruction Sel. Ctries.*, vol. 252, núm. 252, (2000), 95-143.
- [19] Crowther P, "Design for disassembly - themes and principles", *RAIA/BDP Environ. Des. Guid.*, núm. August, p. Australia, (2005).
- [20] Aninthaneni P K, Dhakal RP, "Demountable Precast Concrete Frame-Building System for Seismic Regions: Conceptual Development", *J. Archit. Eng.*, vol. 23, núm. 4, (2017), 1–10.
- [21] Xiao J, Ding T, Zhang Q, "Structural behavior of a new moment-resisting DfD concrete connection", *Eng. Struct.*, vol. 132, (2017), 1–13.
- [22] Denis F, Vandervaeren C, Temmerman N De, "Using network analysis and BIM to quantify the impact of Design for Disassembly", *Buildings*, vol. 8, núm. 8, (2018), 1–22.
- [23] Ikonen J, Knutas A, Hämäläinen H, Ihonen M, Porras J, Kallonen T, "Use of embedded RFID tags in concrete element supply chains", *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 18, núm. October 2014, (2013), 119–147.
- [24] Cheng MY, Chang NW, "Radio frequency identification (RFID) integrated with building information model (BIM) for open-building life cycle information management", *Proc. 28th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2011*, (2011), 485–490.
- [25] Eberhardt LCM, Birgisdóttir H, Birkved M, "Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly", *Build. Res. Inf.*, vol. 47, núm. 6, (2019), 666–680.
- [26] Rasmussen FN, Birkved M, Birgisdóttir H, "Upcycling and Design for Disassembly - LCA of buildings employing circular design strategies", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 225, núm. 1, (2019).
- [27] Trigaux D, De Troyer F, Allacker K, Paduart A, Debacker W, De Temmerman N, "LCC and LCA of dynamic construction in the context of social housing", en *SB13 Graz – Sustainable Buildings, Construction Products & Technologies*, (2013), 437–447.
- [28] ISO, *ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines Management*, ISO. ISO, (2006).
- [29] Camilloni I, Barros V, "Argentina y el Cambio Climático", *Cienc. Invest.*, vol. 68, núm. 5, (2018), 5–10.
- [30] Vandenbroucke M, "Implementing dynamic load-bearing structures on a generic case study Short Summary", en *Proceedings of SB13 Graz on Construction Products and Technologies*, (2013), 1487–1498.