

Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos

J. M. Mendoza-Rangel¹ , J. H. Díaz-Aguilera^{1*} 

*Autor de Contacto: jhda_ic24@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>

Recibido: 19/07/2023 | Correcciones recibidas: 24/08/2023 | Aceptado: 31/08/2023 | Publicado: 01/09/2023

RESUMEN

Los modelos convencionales de producción en la industria del cemento y el concreto (ICC) asocian problemas ambientales importantes; por otro lado, existen tecnologías emergentes que podrían disminuirlos. No obstante, se requiere del enfoque multidimensional de la economía circular para orientar el desarrollo sostenible de manera perdurable, modelando el ciclo de vida desde el diseño hasta la disposición final para optimizar la relación valor-impacto ambiental; ya que sólo una industrial circular, resiliente y proactiva puede afrontar los objetivos de desarrollo sustentable de la agenda 2030 (ONU) o la meta de emisiones cero. Este trabajo presenta conceptos generales de economía circular, así como un análisis de alternativas y aplicabilidad con el fin de concientizar a los actores de la ICC en Latinoamérica.

Palabras clave: economía circular; sustentabilidad; industria del cemento y concreto; diseño eficiente; durabilidad.

Citar como: Mendoza-Rangel, J. M., Díaz-Aguilera, J. H. (2023), “Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos”, Revista ALCONPAT, 13 (3), pp. 328 – 348, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Nuevo León, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, J.M. Mendoza-Rangel contribuyó con la idea original, la redacción del trabajo y la discusión; J.H. Díaz-Aguilera contribuyó con la redacción del trabajo y la discusión.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2024.

Circular economy in the Latin American cement and concrete industry: a sustainable solution of design, durability, materials, and processes

ABSTRACT

Conventional models of production in the cement and concrete industry (CCI) associate important environmental problems; on the other hand, there are emerging technologies that could reduce them. However, the multidimensional approach of the circular economy is required to guide sustainable development in a lasting manner, modeling the life cycle from design to final disposal aiming to optimize the value-environmental impact relationship; since only a circular, resilient, and proactive industry can meet the 2030 Agenda of sustainable development (ONU) or the goal of zero emissions. This work presents general concepts of circular economy, as well as an analysis of alternatives and applicability in order to raise awareness among CCI actors in Latin America.

Keywords: circular economy; sustainability; cement and concrete industry; efficient design; durability.

Economía circular na indústria latino-americana de cimento e concreto: uma solução sustentável de design, durabilidade, materiais e processos

RESUMO

Os modelos convencionais de produção na indústria de cimento e concreto (ICC) associam importantes problemas ambientais; por outro lado, existem tecnologias emergentes que podem reduzi-los. No entanto, a abordagem multidimensional da economia circular é necessária para orientar o desenvolvimento sustentável de forma duradoura, modelando o ciclo de vida desde a concepção até a disposição final para otimizar a relação valor-impacto ambiental; pois somente uma indústria circular, resiliente e proativa pode enfrentar os objetivos de desenvolvimento sustentável da agenda 2030 (ONU) ou a meta de emissões zero. Este trabalho apresenta conceitos gerais de economia circular, bem como uma análise de alternativas e aplicabilidade para conscientizar os atores da ICC na América Latina.

Palavras-chave: economia circular; sustentabilidade; indústria de cimento e concreto; projeto eficiente; durabilidade.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto global, existe una urgencia por aminorar los problemas asociados con el cambio climático, lo cual involucra la actividad de las diferentes industrias incluida la del cemento y el concreto (Adesina, 2020; Villagrán-Zaccardi y col., 2022; Zajac y col., 2022). Una de las directrices para lograr esta meta son los 17 objetivos de desarrollo sustentable (ODS) de la agenda 2030 (United Nations, 2023), entre los cuales existen algunos relacionados con la necesidad de fomentar la sostenibilidad en la industria del cemento y del concreto (ICC). El ODS 6 de agua limpia y saneamiento, implica optimizar el uso de los recursos hídricos en los procesos de producción y construcción (Muñoz-Zapata y col., 2022; Nodehi y col., 2022; United Nations, 2023). El ODS 7 promueve el acceso sostenible a la energía, lo que implica la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (EGEI) asociadas a la producción de los materiales de construcción, como el cemento (Colangelo y col., 2020). El ODS 9 fomenta la innovación y la infraestructura sostenibles, que incluye la promoción de tecnologías verdes y eficientes en la producción de cemento y concreto (GCCA, 2023; NoParast y col., 2021). El ODS 11 se centra en lograr ciudades y comunidades sostenibles, lo que incide en las prácticas de construcción, la huella de carbono asociada a los edificios e infraestructuras, la planificación de los sistemas de transporte, diseño urbano, edificios energéticamente eficientes y soluciones de movilidad sostenible (Mostert y col., 2021). El ODS 12 tiene como meta alcanzar modelos sustentables de producción-consumo, esto es la reducción del uso de materiales no renovables y alternativas como el uso de cementos con menor contenido de Clinker (Geisendorf y col., 2018; GCCA, 2023). El ODS 13 se relaciona con la promoción de propuestas en torno a disminuir los efectos del cambio climático; p. ej.: la disminución de las EGEI asociadas al cemento y el concreto (Maury-Ramírez y col., 2022; United Nations, 2023). El ODS 15, se asocia con los procesos de obtención de las materias primas, rehabilitación de canteras, protección y restauración de la biodiversidad (Adesina, 2020; Villagrán-Zaccardi y col., 2022). Asimismo, el ODS 17 incita a la creación de alianzas para lograr los ODS; p. ej., la colaboración entre distintos actores para el desarrollo de investigación y tecnología sostenible de los materiales de construcción (Marsh y col., 2022).

Por otra parte, América Latina concentra una diversidad de países en desarrollo, lo que conduce a la necesidad de construir infraestructura a diferentes escalas y el subsecuente consumo de grandes volúmenes de cemento y concreto (Zajac y col., 2022). En términos de capacidad instalada, las plantas de cemento de la región alcanzan las 271 Mt, pero la producción fue de 170 Mt en 2019; de la cual el 68% se distribuyó en sacos, el 25% en concreto premezclado, 2% en concreto prefabricado y 5% en otras formas (morteros, etc.). Cabe señalar que el escenario óptimo esperado para 2020, 2030 y 2050 es un aumento en la producción de 196, 198 y 227 Mt; no obstante, el factor Clinker debería reducirse a 0.66, 0.53 y 0.51, respectivamente (GCCA, 2023). Estas reducciones son de interés ya que involucran: i) una explotación importante de recursos naturales, tales como agua, piedra caliza, arcilla, arena, etc. (Nodehi y col., 2022); ii) emisiones de CO₂ y consumo de energía debido a la descomposición térmica de la caliza, maquinaria de minería, transporte, etc. (Colangelo y col., 2020; NoParast y col., 2021); y iii) la generación de desechos como los desperdicios de obra, productos de demolición, etc. (Mostert y col., 2021). Por lo tanto, según la Federación Interamericana del Cemento (FICEM), para lograr la meta de cero emisiones de CO₂ se espera que de 110 Mt en 2020 se reduzcan a 0 Mt para 2050, lo cual requerirá la implementación de varias tecnologías y estrategias tales como el uso de materiales cementantes suplementarios, el desarrollo de nuevos cementantes, eficientizar el diseño y construcción con concreto, tecnologías para la captura de carbono y la obtención de materiales con valor agregado como la recarbonatación de desechos industriales, minerales naturales y otros (Villagrán-Zaccardi y col., 2022; Zajac y col., 2022).

Ante los retos anteriormente descritos emerge la propuesta de la economía circular (EC), la cual se

basa en la evaluación del ciclo de vida de los materiales y procesos con el fin de maximizar la relación entre el valor del producto y el impacto ambiental a largo plazo (GCCA, 2023). Esto fomenta una ruta circular de producción-consumo-gestión para que los materiales de construcción se mantengan en uso el mayor tiempo posible, en vez del modelo lineal de explotar recursos naturales, elaborar un producto, utilizarlo y desecharlo (Geisendorf y col., 2018). Algunas estrategias de este enfoque son (Corvellec y col., 2022; Romero y col., 2021; Sehnem y col., 2019): i) la optimización de recursos, es decir, la reducción de desperdicios o recursos indebidamente utilizados durante la producción y uso del cemento y concreto; ii) la reutilización y reciclaje, que favorece el cierre de la vida útil de los materiales provenientes de la ICC o de otras industrias; iii) la regeneración, que implica prolongar el ciclo de vida de los materiales. De esta manera, la EC permite que la ICC logre adaptarse, recuperarse y responder de manera efectiva ante los desafíos ambientales y socioeconómicos, prosperando en un contexto cambiante y aprovechando las oportunidades que ofrece la transición hacia prácticas más sostenibles, asegurando y manteniendo su funcionalidad de manera sostenida en el tiempo.

No obstante, los principios de la EC y su implementación en la ICC aún no están completamente extendidos en Latinoamérica; así lo demuestra la poca literatura científica reportada por institutos de investigación de la región que se encontró para realizar este trabajo (Caldas y col., 2021; Colorado y col., 2020; Hentges y col., 2021; Londoño y col., 2021; Maury-Ramírez y col., 2022; Muñoz-Zapata y col., 2022; Xavier y col., 2021). Adicionalmente, es necesario presentar la información con un enfoque tanto general como particular, siendo éste el primero de una serie de artículos que introducen a las personas involucradas en la ICC sin importar si pertenecen a la comunidad científico-académica, empresarial, técnica o estudiantil. Con estos trabajos se espera contribuir a la difusión, discusión e impulso de esta tendencia internacional en América Latina, sentar las bases para estimular y potenciar su desarrollo, así como catalizar un impacto de gran magnitud en la región. En las siguientes secciones se discuten los fundamentos de la EC y se plantea una clasificación para las investigaciones internacionales en siete áreas de implementación en la ICC: 1) Digitalización del concreto, 2) Innovaciones tecnológicas, 3) Diseño eficiente, 4) Agregados reciclados, 5) Extensión de vida útil, 6) Recursos locales, 7) Procesos eficientes; posteriormente, se realiza un análisis de la aplicabilidad de la EC en la ICC latinoamericana.

2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

Los principios fundamentales de la economía circular (EC) se relacionan con las 5R (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Recuperar, Rediseñar) y buscan transformar la manera en que producimos y consumimos recursos mediante una visión integral que aborda los desafíos ambientales y económicos, con el objetivo de lograr industrias más sostenibles y resilientes; tal como se ha reportado para las industrias: 4.0 (Romero y col., 2021), minera (Xavier y col., 2021), impresión 3D de biomateriales (Wijk y col., 2015), procesamiento de comida (Hamam y col., 2021), diseño industrial (Dam y col., 2020) y otras (Gallaud y col., 2016; González-Domínguez y col., 2020; Londoño y col., 2021). En estos casos, las mejoras se relacionaron con una gestión eficiente de las materias primas naturales y la cantidad de desechos; lo cual sugiere que la ICC también puede aprovechar este enfoque. Los principios de la EC se pueden resumir en cuatro:

1) La regeneración de los sistemas naturales (Romero y col., 2021; Wijk y col., 2015; Xavier y col., 2021): en lugar de agotar los recursos naturales y deteriorar los ecosistemas, la EC propone una integración armónica con la naturaleza a través del uso consciente de los recursos renovables y no-renovables del planeta. Esto es diseñar productos y procesos que regeneren y restauren los recursos naturales, en lugar de degradarlos.

2) La optimización del uso de los recursos (Hamam y col., 2021; Sehnem y col., 2019): implica el uso eficiente de materiales y la generación mínima de desechos, por lo que busca la utilización de

materiales duraderos y de calidad, así como tecnologías y procesos que optimicen los residuos.

3) La circularidad (Gallaud y col., 2016): es mantener los materiales en uso por el mayor tiempo posible, lo que involucra la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje de materiales, además del diseño de productos de tipo modular que sean fáciles de desmontar; esto efficientiza los procedimientos de reparación y mantenimiento. Asimismo, permite la recuperación y reintegración de los materiales en un siguiente ciclo de producción.

4) La colaboración y creación de sinergias: con el fin de maximizar los beneficios por medio del intercambio de conocimientos, diversificación de soluciones y aprovechamiento de recursos disponibles; propone alianzas entre empresas, gobiernos, organizaciones de la sociedad civil, consumidores, etc. (Camilleri y col., 2020; Corvellec y col., 2022).

2.1. Las 5Rs de la economía circular

Las 5Rs se definen de la siguiente manera (Corvellec y col., 2022; Marsh y col., 2022):

- a) Reducir los recursos, desechos industriales y emisiones asociados con la producción de un material; por tanto, es optimizar los procesos de fabricación y consumo energético, así como integrar criterios de diseño por durabilidad. Por ejemplo: es disminuir el consumo de cemento asociado con la elaboración de concreto mediante la optimización de mezclas y el uso de aditivos para lograr las propiedades especificadas por el proyecto (NoParast y col., 2021; Velvizhi y col., 2020).
- b) Reutilizar los materiales al término de su ciclo de vida en vez de desecharlos, lo cual puede implicar la reparación para su reintegración en el mercado. Un ejemplo es la reutilización de estructuras de concreto existentes, como puentes o edificios, mediante su rehabilitación y adaptación para nuevos usos en lugar de demoler o reconstruir (Maury-Ramírez y col., 2022).
- c) Reciclar implica transformar los desechos en productos de valor para una industria, disminuyendo la extracción de materias primas. Esto puede llevar al reciclado de agua de desecho de la producción y lavado de concreto mediante sistemas de tratamiento y purificación (Maury-Ramírez y col., 2022).
- d) Recuperar es obtener recursos de valor a partir de los desechos que no son factibles para reciclar, tales como materias primas, energía eléctrica o térmica. Así, es posible recuperar desechos de otras industrias para fabricar cementos, como las cenizas volantes o escorias (Roychand y col., 2021).
- e) Renovar es restaurar la funcionalidad de los materiales, puede requerir procesos de remanufactura. En las estructuras de concreto, se pueden restaurar las propiedades de durabilidad de los elementos expuestos a ambientes corrosivos mediante técnicas de extracción de iones cloruro, esto disminuye la corrosión de las armaduras y extiende su ciclo de vida (Kosmatka y col., 2004; Taylor, 1997).

3. MODELOS ECONOMÍA CIRCULAR APLICADOS A LA INDUSTRIA DEL CEMENTO Y EL CONCRETO

Con el fin de discutir la integración de la EC en la ICC es necesario conocer algunos modelos propuestos en la literatura, entre los cuales destaca el trabajo de Maury-Ramírez y col. (2022) que evalúa los procesos de la industria de la construcción con el fin de mejorarlos a partir del análisis del proceso de explotación de las materias primas y la manufactura de los materiales de construcción, la etapa de edificación de la infraestructura, el uso y operación del inmueble, así como el final de la vida útil que incluye la generación de los desechos y su disposición final en un vertedero o el reciclado dentro de esta industria u otra (Figura 1). Este modelo se empleó en Santiago de Cali (Colombia), pero podría extenderse a las variables relacionadas con el cemento y

concreto, involucrando las etapas de producción, diseño, construcción, uso, mantenimiento y gestión del término de la vida útil.

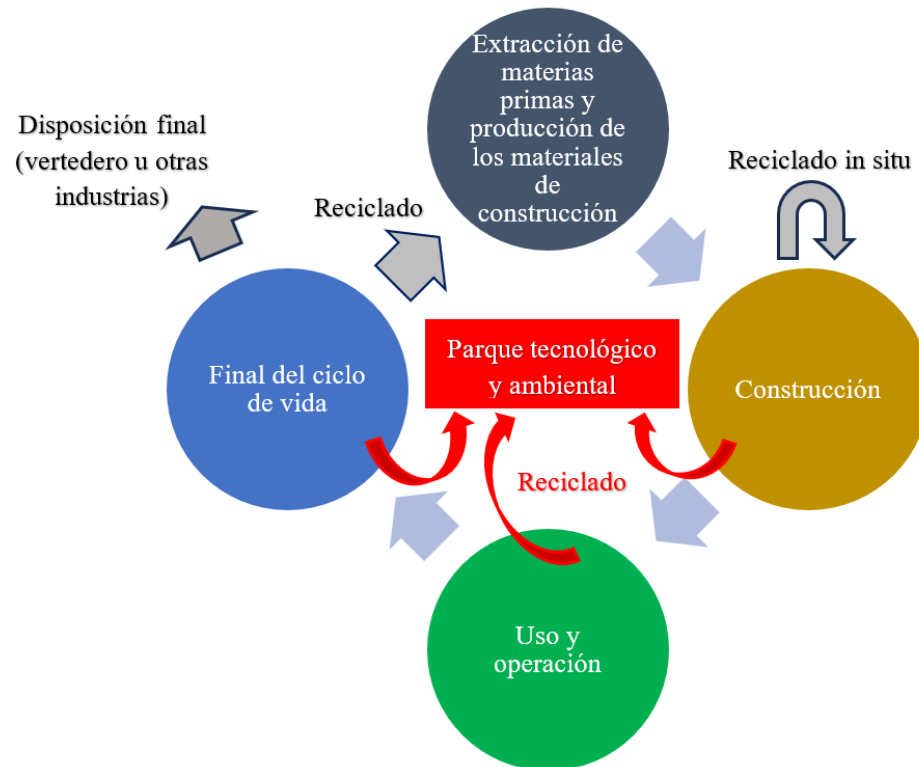


Figura 1. Modelo para la extracción, construcción, operación y gestión de desechos en proyectos de construcción con base en la economía circular.

Cabe señalar que los modelos que se propongan requerirán de la colaboración de las partes involucradas en la cadena de valor de la ICC para poder cumplir su fin, incluyendo a los fabricantes, contratistas, diseñadores, organismos reguladores y consumidores (Corvellec y col., 2022; Marsh y col., 2022). Asimismo, es necesario fomentar la realimentación de las ideas entre los diferentes sectores participantes (industrial, instituciones académicas, organizaciones gubernamentales y la sociedad civil); lo que impulsará la innovación, el desarrollo tecnológico y las buenas prácticas industriales. De igual modo, se requieren marcos normativos y políticas públicas que favorezcan la transición hacia una EC en la ICC, tales como incentivos fiscales, apoyo a la investigación y el progreso de los avances tecnológicos, estándares de sostenibilidad, regulaciones ambientales y programas de capacitación (Marsh y col., 2022; Villagrán-Zaccardi y col., 2022). La implementación exitosa de los modelos de EC no sólo contribuirá a reducir los impactos ambientales, también generará oportunidades económicas como la creación de empleo en sectores de la investigación y gestión de residuos, la producción con base en materiales reciclados y el desarrollo de tecnologías sostenibles y materiales de mayor durabilidad. A continuación, se describen siete áreas de implementación de la EC en la ICC y algunas investigaciones relacionadas con cada área.

3.1 Digitalización del cemento y concreto

La digitalización ofrece la posibilidad de optimizar la composición química de los cementos y la formulación de mezclas de concreto, minimizar los desperdicios de material y mejorar su rendimiento tanto en términos de volumetría como de las propiedades resultantes (NoParast y col., 2021). Para lograr tal control, se requieren diferentes tipos de sensores (Marsh y col., 2022; Maury-

Ramírez y col., 2022) para monitorear en tiempo real (Hossain y col., 2020; Velvizhi y col., 2020) y modelar los procesos de producción de cemento (Atta y col., 2021), tales como la molienda y calcinación; además de eficientizar el mezclado, transporte y colocación de concreto, lo cual requiere de mejoras tecnológicas en los camiones mezcladores, bombas de concreto y otros equipos (Adesina, 2021). Por ejemplo, los sensores recolectan los datos sobre las características de interés del cemento o concreto (temperatura, humedad, resistencia, fluidez, emisiones de efecto invernadero o consumo de energía del proceso, etc.) que se transmiten a una plataforma digital para analizarlos (Marsh y col., 2022; Maury-Ramírez y col., 2022; Velvizhi y col., 2020). Adicionalmente, la digitalización facilita la optimización de la dosificación de los ingredientes y su ajuste en tiempo real (NoParast y col., 2021; Velvizhi y col., 2020).

Otra ventaja es que permite el seguimiento del material (trazabilidad) y la gestión eficiente en el proceso de suministro por medio de actividades de rastreo desde la planta de producción hasta el lugar de la construcción, lo cual incluye el conocimiento preciso de los volúmenes utilizados, tiempos de entrega y otras variables. M. NoParast y col. (2021) desarrollaron un modelo para optimizar la cadena de manufactura y suministro de concreto que consiste en el análisis de diferentes subsistemas: los clientes, proveedores, así como las locaciones de la manufactura y reciclaje. El objetivo fue minimizar la extracción de materias primas, el costo de transportación y las emisiones de efecto invernadero (Figura 2).

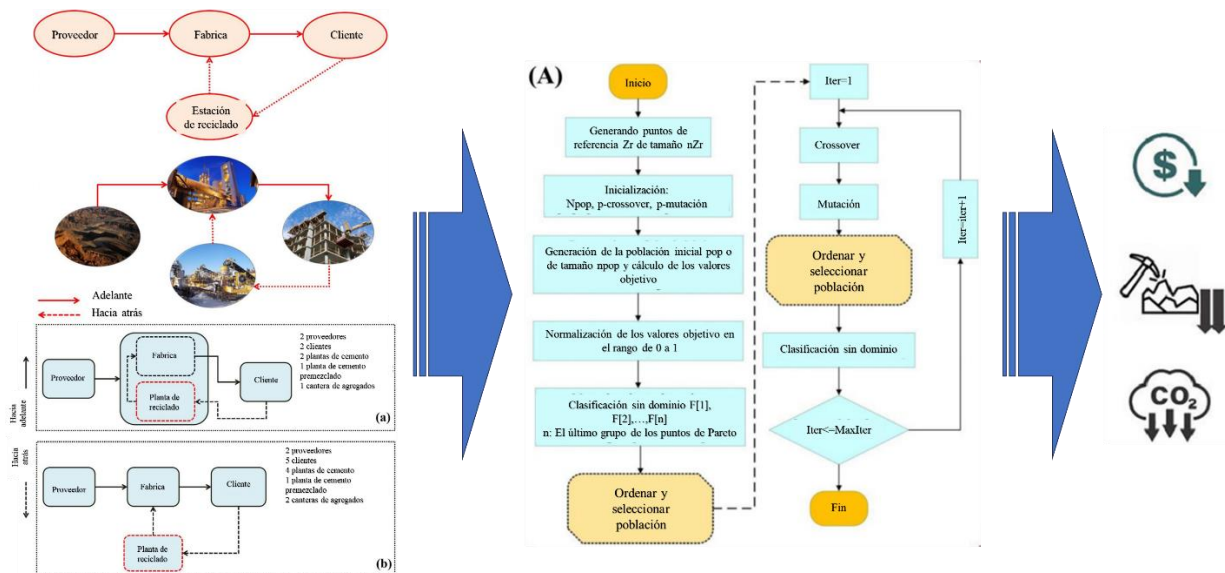


Figura 2. Modelo aplicado a las actividades de suministro de concreto con base en la economía circular (NoParast y col., 2021).

Por otra parte, el Building Information Modeling (BIM) y la impresión 3D son componentes importantes de la digitalización. La primera es una metodología que permite crear modelos digitales tridimensionales de edificios, infraestructuras y proyectos de construcción, que contienen información detallada de los elementos de construcción tales como los parámetros de diseño, tipo de concreto, dimensiones de las estructuras y ubicación en la edificación, características de las instalaciones, etc. (Sudarsan y col., 2023). Así, BIM posibilita optimizar la planificación, diseño y gestión del proyecto, que es afectado por las variables asociadas al uso de cemento y concreto en la logística de suministro, simulación y análisis estructural, procedimientos constructivos, etc.; esto permite una mejor toma de decisiones que reduce los errores durante la construcción (Atta y col., 2021). Cabe resaltar que BIM facilita la comunicación y colaboración entre los actores del proyecto porque permite acceder y actualizar la información del modelo en tiempo real (Atta y col., 2021; Sudarsan y col., 2023), optimizando el uso del cemento y concreto, los desechos y los tiempos de

construcción. I. Atta y col. (2021) propuso un método de diseño sustentable basado en la herramienta de Material Passport (MP) (Figura 3), el cual requiere de parámetros de entrada como las herramientas para la evaluación de la sustentabilidad, detalles técnicos del material y establecer los indicadores para determinar la disposición final; con estos datos se diseña el MP que es digitalizado mediante BIM y la información se procesa para validar las características de manufactura y del caso específico de estudio donde se utilizará el material.

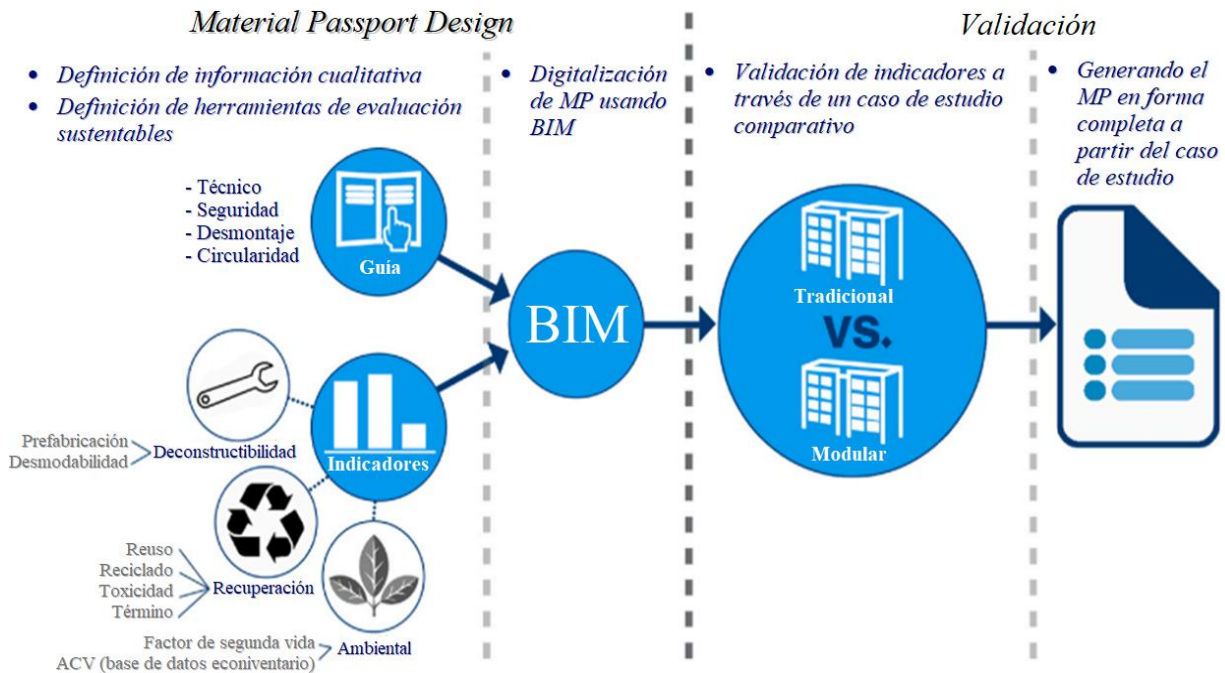


Figura 3. Diseño sustentable de concreto mediante el Material Passport (Atta y col., 2021).

La impresión 3D (fabricación aditiva) permite crear objetos tridimensionales capa por capa a partir de un diseño digital (Wijk y col., 2015). En el contexto del cemento y concreto, este método permite la fabricación automatizada de elementos estructurales y arquitectónicos de manera precisa, con una mayor eficiencia en términos de diseño, planeación y construcción de los proyectos, respecto de las técnicas tradicionales (Colorado y col., 2020; Şahin y col., 2022).

En resumen, la digitalización del cemento y concreto aprovecha la tecnología para mejorar el control de calidad, eficiencia y trazabilidad en la vida útil proyectada, lo que promueve un mayor control de propiedades, evitando la sobreproducción y garantizando los requerimientos específicos de una obra, todo lo cual disminuye la huella ambiental.

3.2. Innovaciones tecnológicas en la construcción

La adopción de innovaciones tecnológicas como la impresión 3D (Şahin y col., 2022), el uso de materiales avanzados (Chakartnarodom y col., 2022; Colorado y col., 2020) y la prefabricación (Minunno y col., 2018), optimiza la utilización de recursos. La amplia gama de materiales avanzados ofrece propiedades superiores al concreto convencional que mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad por medio de diferentes mecanismos físicos y químicos, contribuyendo a su eficiencia y sostenibilidad en el contexto de la EC. Algunos ejemplos son las fibras de refuerzo (Tari y col., 2022), nanomateriales (Cosentino y col., 2020) y aditivos especiales (Dikshit y col., 2022). Las primeras pueden ser de acero (Liew y col., 2020), vidrio (Tari y col., 2022) o un polímero (Vitale y col., 2021), y son capaces de reducir los agrietamientos ante las cargas impuestas; además, pueden reemplazar o reducir la cantidad de varillas de acero en las estructuras de concreto (Liew y col., 2020), lo que disminuye el consumo de recursos naturales. Se deben

mencionar las fibras de origen natural como el sargazo (Rossignolo y col., 2022) o el agave (Juárez-Alvarado y col., 2020), ya que pueden mejorar las propiedades térmicas y de confort de los blocks de concreto. Por otro lado, nanomateriales como los nanotubos de carbono (Yousef y col., 2021) o la nanoslice (Al-mousa y col., 2022), reducen la porosidad de la matriz cementante, lo que resulta en una menor difusividad de agentes agresivos que deterioren el concreto o el acero de refuerzo. Otra innovación de interés son los cementos activados alcalinamente, los cuales pueden sustituir el uso del cemento Portland en algunas aplicaciones donde se requieren elementos prefabricados de mayor resistencia a medios agresivos o alta resistencia mecánica en un menor tiempo de fraguado (Shi y col., 2006). Aunque pueden elaborarse con base en materiales de desecho como escoria, ceniza volante y lodos de bauxita, destacan los elaborados con metacaolín y piedra caliza; esto debido a la semejanza de sus materias primas respecto del cemento Portland, pero con la ventaja de que la transformación caolín-metacaolín se puede realizar aproximadamente a la mitad de la temperatura del Clinker y la piedra caliza no requiere calcinación, solo pulverizarse. Además, recientemente se reportó que el uso de los activadores alcalinos de silicato de sodio e hidróxido de sodio puede optimizarse, lo cual disminuye aún más el impacto ambiental, costo y energía de producción con respecto del cemento Portland ordinario o mezclado (Pérez-Cortes y Escalante-García, 2020).

Por otra parte, los aditivos especiales son químicos que se agregan al concreto durante el mezclado; algunos ejemplos son (Taylor, 1997): i) los aditivos reductores de agua, que minimizan esta cantidad sin comprometer la trabajabilidad de las mezclas, facilitando su colocación y compactación (Muñoz-Zapata y col., 2022); ii) aditivos acelerantes del fraguado y endurecimiento, que se utilizan en condiciones de bajas temperaturas o proyectos que requieren una rápida puesta en servicio (Roychand y col., 2021); iii) aditivos retardantes del fraguado, los cuales son útiles en climas cálidos, en proyectos que requieren un tiempo de mezclado prologado debido al transporte por largas distancias del concreto fresco o por condiciones especiales de colocación (Tari y col., 2022); iv) aditivos expansivos, para controlar la contracción del concreto durante el fraguado y reducir la fisuración (Zhang y col., 2023); v) aditivos impermeables, que reducen el paso del agua y previenen filtraciones (Akchurin y col., 2016).

Por último, la prefabricación es una técnica constructiva de elementos estructurales (muros, vigas, columnas, losas, etc.) en un entorno controlado para luego transportarlos al sitio de construcción y ensamblarlos (Kosmatka y col., 2004). Permite un mayor control de calidad por medio de sistemas de monitoreo y pruebas de laboratorio, reduciendo los plazos de construcción y facilitando su instalación, además minimiza los desperdicios de materiales en obra y mejora la eficiencia en el uso de recursos, ya que tanto el diseño como la manufactura de los elementos se realiza en apego a los requerimientos del proyecto (Minunno y col., 2018).

3.3. Proyectos de diseño eficiente

El diseño eficiente de las estructuras de concreto contribuye a minimizar el uso de recursos y los impactos ambientales, además de maximizar el desempeño de los elementos por medio de algunas técnicas de diseño como la optimización estructural (Yang y col., 2022), el análisis del ciclo de vida (Mostert y col., 2021) y de emergía (Wang y col., 2022).

La optimización estructural o el diseño estructural eficiente, implica encontrar la geometría y la dosificación de los materiales óptimos para una estructura de concreto, lo que minimiza las cantidades de concreto y acero, reduciendo la huella ambiental por la optimización de recursos naturales. Esto se logra por medio de una modelación matemática basada en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los materiales, pero tomando en cuenta los factores de seguridad, las relaciones de costo-beneficio y las posibles patologías que podrían afectar la estructura (Marsh y col., 2022; Yang y col., 2022). Fabricar concretos de alto desempeño y durabilidad, puede implicar el uso de materiales avanzados, así como sistemas constructivos ligeros o de alta eficiencia

(losas aligeradas, arriostramientos adecuados o la optimización de uniones y soldadura) (Adesina, 2021).

El análisis de ciclo de vida (ACV) permite determinar el impacto ambiental de una estructura de concreto asociado con su vida útil (Wang y col., 2022), a través de identificar las mayores problemáticas ambientales y permitiendo gestionar las estrategias necesarias para minimizarlas durante las diferentes etapas del proyecto. Algunos ejemplos son la energía incorporada en los componentes del cemento y el concreto, las EGEI durante la fabricación y transporte, así como el potencial reciclaje de los desechos (Mostert y col., 2021; Wang y col., 2022). El ACV permite tomar decisiones informadas desde el diseño de la estructura, seleccionando materiales y sistemas constructivos de menor impacto ambiental en función de la demanda de energía, emisiones y uso de recursos. Entre las investigaciones de ACV, destaca el trabajo de C. Mostert y col. (2021) que evalúa la huella climática y de recursos de concreto reciclado. La Figura 4 muestra el modelo para el ACV que abarca todas las etapas de la vida útil del concreto: obtención de las materias primas, transporte, producción del concreto, su demolición y reciclaje como agregado para un concreto nuevo con/sin aplicación estructural.

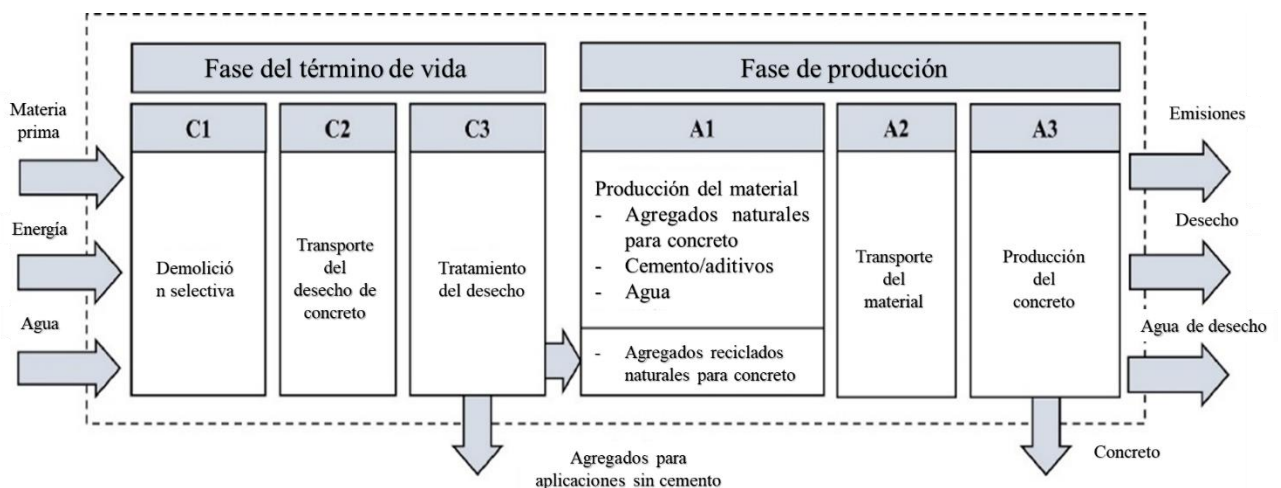


Figura 4. Modelo para el análisis ciclo de vida de concreto reciclado (Mostert y col., 2021).

Por el otro lado, el análisis energético es una herramienta del diseño eficiente que se basa en los principios de la termodinámica para evaluar la cantidad de energía que se ha invertido en un material durante su vida útil de manera directa (como la electricidad consumida durante la producción y transporte) e indirectamente (como la energía solar, fósil y otras, necesarias para la extracción, procesamiento y fabricación), es decir, con relación en los recursos naturales utilizados para elaborar un material (Amaral y col., 2016). En consecuencia, permite evaluar la eficiencia energética de un sistema, identificar estancamientos energéticos y determinar las fuentes de energía más significativas en términos de su contribución al sistema. Respecto de estructuras de concreto, se pueden evaluar las alternativas en términos de demanda energética y seleccionar las opciones de menor consumo, lo cual incluye la elección de materiales con menor contenido energético, la optimización del proceso de producción y transporte, así como las estrategias de diseño, construcción y mantenimiento que minimicen el consumo energético durante el ciclo de vida del elemento (Wang y col., 2022).

3.4. Utilización responsable de agregados reciclados

La reutilización de agregados provenientes de la trituración de concreto [8] o de otros materiales de desecho (Marsh y col., 2022; Nodehi y col., 2022) puede disminuir la demanda de materias primas primarias y la generación de desechos, lo que permite cerrar el ciclo de vida del concreto y

otros materiales simultáneamente con el fin de promover una gestión más eficiente de los recursos. Algunos ejemplos son los desechos de: ladrillo (Fořt y col., 2020), vitrocerámica (Rada y col., 2023) y adoquines (Neves y col., 2022), block cerámico (Barreto y col., 2021) o de concreto (Fořt y col., 2020), asfalto (Delwar y col., 1997; Linek y col., 2023), polímeros como el PVC (Taghvaei y col., 2022), PET (Al-Sinan y col., 2022) y caucho de neumático (Díaz-Aguilera y col., 2021), agroindustriales como la ceniza de cáscara de arroz (Althoey y col., 2022) y de bagazo de caña (Ariza-Figueroa y col., 2022), vidrio pulverizado (Nodehi y col., 2022), entre otros. Estos materiales reciclados se procesan y utilizan como sustituto de los agregados convencionales (grava y arena) en la mezcla de concreto.

Algunos beneficios de utilizarlos son:

- i) La minimización de la demanda de materias primas naturales que disminuye la extracción y procesamiento de recursos como la arena y grava de los ríos (Nodehi y col., 2022).
- ii) La gestión eficiente de residuos, es decir, el uso productivo de materiales que de otro modo se consideraría un desecho y terminaría en vertederos, brindándoles una segunda vida útil al ser utilizados como agregados en nuevas estructuras de concreto (Marsh y col., 2022).
- iii) La disminución de la demanda de energía y de las EGEl, ya que la producción de agregados reciclados requiere menos energía en comparación con la extracción y procesamiento de materiales naturales (Ariza-Figueroa y col., 2022).

Cabe mencionar que la utilización de agregados reciclados requiere un adecuado proceso de selección, clasificación y procesamiento para asegurar su calidad, cumpliendo los requisitos de resistencia, durabilidad y otras propiedades de interés del concreto (Al-Sinan y col., 2022; Althoey y col., 2022; Díaz-Aguilera y col., 2021). Un ejemplo de la implementación de la EC y agregados reciclados de vidrio fue publicado por M. Nodehi y col. (2022). La Figura 5 es un modelo triangular que relaciona los beneficios ambientales con los económicos y la recuperación de recursos a partir del concepto de las 6Rs: remanufactura, rediseño, reciclado, reuso, recuperación y reducción del desecho.

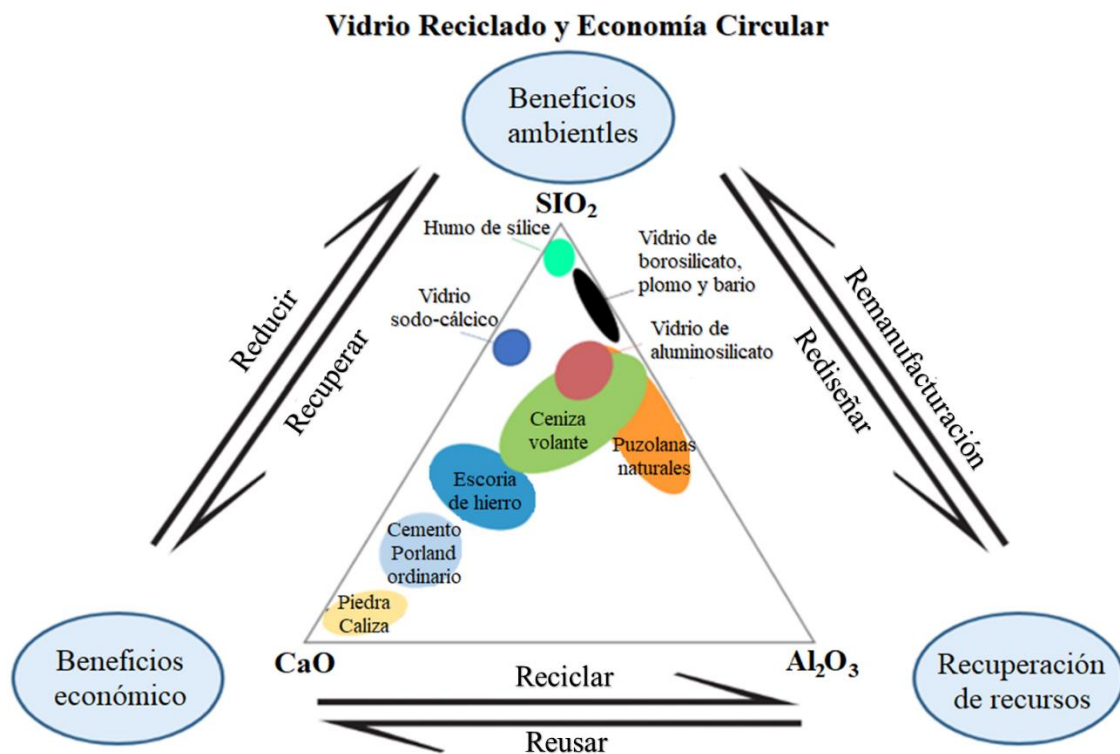


Figura 5. Modelo de economía circular para agregados de desecho de vidrio

3.5. Extensión del ciclo de vida de las estructuras de concreto

Al promover el mantenimiento, la rehabilitación y la renovación de las estructuras de concreto, se puede extender la proyección del ciclo de vida y disminuir la necesidad de construir nuevas obras (Breugel, 2017). Esto implica adoptar procedimientos de diseño que busquen incrementar la durabilidad de los materiales, así como la implementación de técnicas de reparación, renovación y refuerzo estructural. Por lo tanto, la extensión del ciclo de vida se refiere a la prolongación de la vida operativa de las estructuras de concreto en lugar de optar por demolerlas y reconstruirlas (Anastasiades y col., 2020; Bourke y col., 2019).

Para lograr un ciclo de vida más prolongado en el concreto, se pueden aplicar los siguientes enfoques:

i) El diseño por durabilidad consiste en proponer nuevas estructuras de concreto considerando los criterios que promuevan la minimización de los fenómenos de deterioro y maximice la longevidad de los elementos. Esto implica utilizar materiales de alta calidad, técnicas constructivas adecuadas acompañadas de una supervisión rigurosa, sistemas de protección contra la corrosión, así como la consideración de las cargas y condiciones ambientales a las que estará expuesto el elemento de concreto a lo largo de su ciclo de vida (Breugel, 2017); por lo tanto, este tipo de diseño reduce la probabilidad de daños y degradación prematura.

ii) El mantenimiento preventivo de forma regular y adecuada es esencial para asegurar la durabilidad y el buen estado de las estructuras de concreto a lo largo del tiempo. El monitoreo y la inspección constante permiten identificar y abordar de manera oportuna cualquier signo de deterioro, desgaste o daño (Anastasiades y col., 2020; Ariza-Figueroa y col., 2022). Esto puede incluir actividades de limpieza, sellado de grietas, reemplazo de elementos deteriorados, mantenimiento de sistemas de drenaje y control de la corrosión; lo que ayuda a prevenir problemas mayores en el tiempo.

iii) La reparación y refuerzo estructural se aplica a las estructuras de concreto con daños o deterioro significativo en lugar de demoler y reconstruir. Estas técnicas corrigen los problemas identificados y devuelven la integridad estructural por medio de reparaciones como la restauración de la resistencia, impermeabilización, reemplazo de elementos dañados y reparación de grietas (Bourke y col., 2019). El refuerzo estructural implica adicionar elementos o sistemas que fortalezcan la estructura y mejoren su capacidad de carga. Todo esto ayuda a prolongar la vida útil de manera efectiva y económica.

No obstante, para consolidar estos enfoques se requiere de modelos esquemáticos de vida útil que orienten sobre la etapa en que se encuentra la estructura de concreto y las acciones que se pueden realizar para prolongar su durabilidad. En este sentido, un ejemplo se presenta en la Figura 6 (Castro y Helene, 2007), en el cual la vida útil se divide en 7 etapas. Este modelo es presentado bajo una filosofía integral, la cual divide el ciclo de vida en etapas que están en concordancia con la planeación del proyecto, así como con la aplicación de la economía circular de acuerdo con las necesidades específicas de cada etapa. Por ejemplo, para lograr un desempeño óptimo, se analizan las primeras tres etapas que incluyen la planeación, preparación y el día de la puesta en servicio de la vida útil. La condición mínima de servicio se mantiene solamente durante la cuarta etapa, donde un mantenimiento preventivo contra el ingreso de sustancias agresivas es requerido (enfoque ii para ampliar el ciclo de vida). En general, las etapas cinco, seis y siete son en donde la estructura no presenta más un desempeño aceptable. Estos estados incluyen la vida de servicio residual, la vida residual y el término de la vida residual, en el cual se analizaría el enfoque iii de reparación y refuerzo estructural descrito anteriormente. Consecuentemente, la extensión del ciclo de vida del concreto implica el ahorro de recursos, energía y emisiones asociadas con nuevas construcciones. Además, minimiza los desechos que son producto de la demolición y se disminuye la dependencia relacionada con los recursos no-renovables al mantener y aprovechar al máximo las estructuras existentes (Anastasiades y col., 2020).

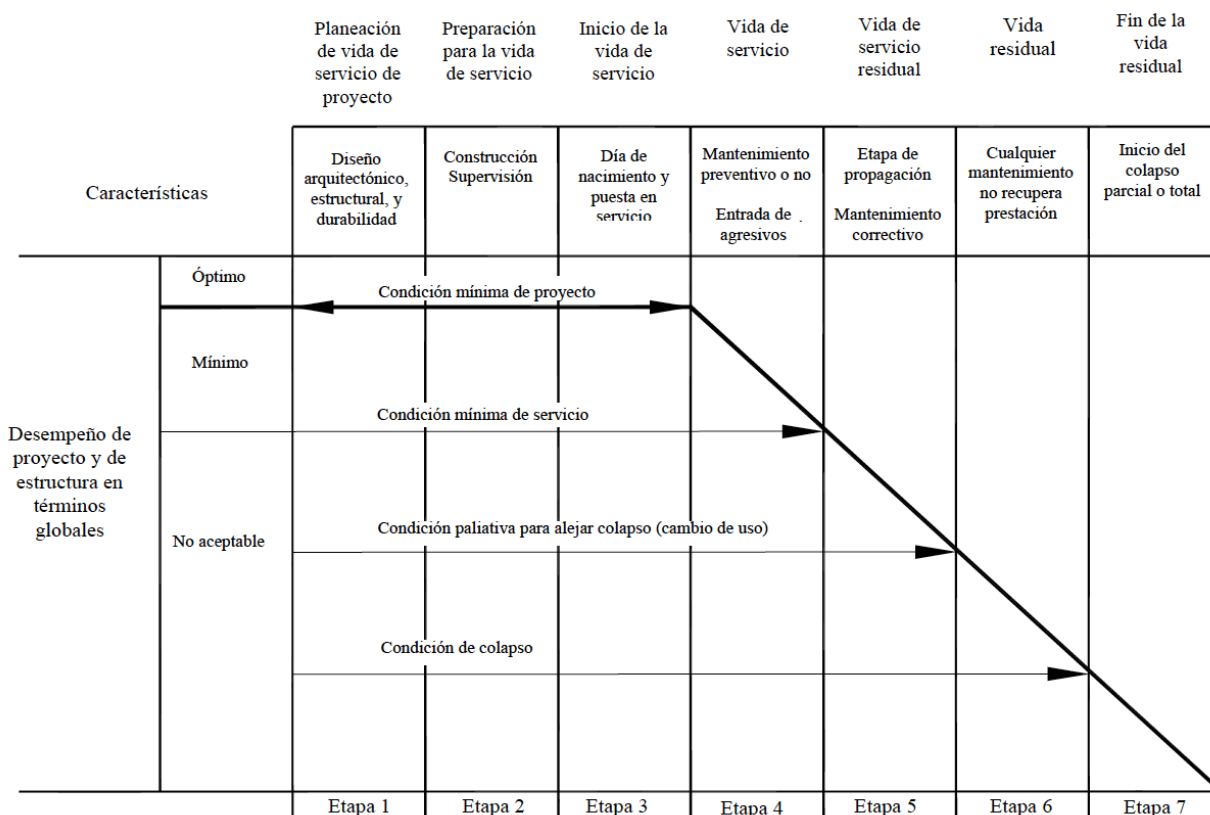


Figura 6. Modelo esquemático de vida útil de 7 etapas (Castro y Helene, 2007).

3.6. Identificación y uso de recursos locales

La utilización de los recursos locales en la fabricación de cemento y concreto implica el uso de fuentes de materias primas cercanas a las plantas de producción, reduciendo las distancias de transporte y, por lo tanto, el impacto ambiental (Caldas y col., 2021; Mostert y col., 2021). También minimiza la necesidad de importar materias primas, los costos de producción y transporte, así como la desventaja ante el cambio de los precios de los materiales externos a la región (Iacovidou y col., 2017), volviendo a la ICC más resiliente y sostenible en términos económicos.

Al mismo tiempo, fomenta el progreso socioeconómico en las zonas de extracción de los materiales; esto es debido a la creación de empleo local, lo que fortalece las cadenas de suministro de la región (Geisendorf y col., 2018). Es importante mencionar que esta estrategia debe realizarse de manera responsable y sostenible por medio de tomar en cuenta los aspectos socioambientales (Corvellec y col., 2022; Maury-Ramírez y col., 2022), es decir, estableciendo prácticas adecuadas de extracción y gestión de recursos naturales que garanticen la protección de los ecosistemas y el respeto a las comunidades locales.

Algunos ejemplos son las utilización de escorias metalúrgicas (Phiri y col., 2021), las cenizas volantes (Ghosh y col., 2020) provenientes de las plantas termoeléctricas, las puzolanas naturales como las arenas volcánicas (Contrafatto, 2017), el humo de sílice (Al-Hamran y col., 2021), las pumitas (Uлуу y col., 2023) o las cenizas de cáscara de arroz (Althoey y col., 2022), productos de demolición de concreto (Lederer y col., 2020), arenas y gravas de canteras locales, entre otros. Estos materiales servirán como reemplazo del cemento o los agregados, mejorando las propiedades de las mezclas cementantes por medio de su reactividad puzolánica y otros procesos (Kosmatka y col., 2004); no obstante, siempre es importante evaluar la calidad de estos recursos para garantizar su idoneidad.

3.7. Optimización de los procesos

El mejoramiento de procesos puede enfocarse en la manufactura de cemento o en los procesos constructivos con concreto (Fay y col., 2014; Guimarães y col., 2021; Pérez y col., 2009). Por ejemplo, la EC involucra la adopción de tecnologías más limpias, como la captura (Kaliyavaradhan y col., 2020) y almacenamiento de carbono (Hanif y col., 2023), la utilización de combustibles alternativos de bajas emisiones (Chatterjee y col., 2019; Villagrán-Zaccardi y col., 2022), así como la implementación de prácticas para la optimización de energía como la cogeneración de calor y energía, la captura de calor residual y la utilización de energías renovables (Mathews y col., 2011; Sharifikolouei y col., 2021).

Por otra parte, la optimización de los procesos constructivos se puede realizar a través de la utilización eficiente de los materiales de construcción (Geisendorf y col., 2018), el uso adecuado de maquinaria y equipos (Marsh y col., 2022), así como la planificación eficiente de la logística (Sehnm y col., 2019). Por lo tanto, la mejora de estos procesos consiste en implementar prácticas y técnicas que optimicen los sistemas utilizados (Hentges y col., 2021), pero que simultáneamente reduzcan significativamente el consumo de recursos y el deterioro ambiental asociado.

Un área clave para mejorar la eficiencia es la gestión de los recursos materiales, tales como los residuos de construcción y demolición con concreto (Hentges y col., 2021; Lederer y col., 2020). En lugar de considerar los residuos como desechos, se pueden implementar estrategias de gestión que promuevan la reutilización, reciclaje y recuperación de materiales, lo que implica separarlos durante la demolición, establecer sistemas de recolección y clasificación de residuos en los sitios de construcción con el fin utilizar estos materiales en nuevos proyectos (Lederer y col., 2020). Otra manera de mejorar la gestión de recursos es una mayor capacitación en materia de tecnología del concreto y química del cemento, con el objetivo de optimizar el manejo y supervisión en obra de estos materiales (Kosmatka y col., 2004; Taylor, 1997).

Además, el uso adecuado de maquinaria y equipos en la construcción puede contribuir a una mayor eficiencia y reducción del consumo de recursos (Hentges y col., 2021; Karlsson y col., 2020; Villagrán-Zaccardi y col., 2022). La selección de maquinaria eficiente, con tecnologías de bajo consumo energético y emisiones reducidas, puede optimizar el rendimiento y minimizar los impactos ambientales (Karlsson y col., 2020). Asimismo, la implementación de prácticas de mantenimiento y capacitación adecuadas garantiza el uso adecuado de los equipos y extiende su ciclo de vida, evitando la necesidad de reemplazarlos con frecuencia.

La logística eficiente relacionada con los procesos constructivos es otro aspecto importante; por ejemplo, esto implica optimizar las rutas de transporte, la distancia de viaje, la carga de los vehículos, las emisiones y el consumo de combustible (Karlsson y col., 2020; NoParast y col., 2021); esto además aumentaría la vida útil de las carreteras. Por otra parte, la programación y coordinación adecuadas de las actividades de construcción pueden evitar retrasos innecesarios, reducir el tiempo de ejecución de obra y el uso óptimo de los recursos.

La mejora de los procesos constructivos también puede involucrar la utilización de sistemas modulares y prefabricados, ya que esto reduce la necesidad de trabajos en el sitio, ahorrando tiempo y recursos (Minunno y col., 2018). Otra estrategia puede ser la estandarización en función del uso de los materiales, los procesos constructivos y de manufactura en la industria de la construcción (Villagrán-Zaccardi y col., 2022).

4. APLICABILIDAD DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA LATINOAMERICANA DEL CEMENTO Y EL CONCRETO

La EC ofrece una gran oportunidad para lograr la sostenibilidad de la ICC en Latinoamérica; sin embargo, es importante tener en cuenta las condicionantes de la región para aplicar efectivamente estos principios circulares. Algunos factores son el marco normativo, la infraestructura de reciclaje,

la disponibilidad y calidad de los materiales reciclados, las condiciones socioeconómicas y culturales, así como la cooperación regional (Maury-Ramírez y col., 2022).

En primer lugar, la implementación exitosa de la EC en la ICC en Latinoamérica requiere un marco normativo y regulador sólido (United Nations, 2023; Villagrán-Zaccardi y col., 2022). Esto significa conocer o desarrollar las políticas y regulaciones que promuevan la adopción de prácticas circulares para la reutilización de desechos, la adopción del diseño eficiente en los proyectos de infraestructura, la gestión adecuada de productos de demolición, etc.

Luego, se requiere contar con la infraestructura de reciclaje y gestión de residuos para realizar la separación y clasificación en los sitios de construcción (Colangelo y col., 2020; NoParast y col., 2021). La inversión en la infraestructura y capacitación de profesionales en la gestión de residuos son fundamentales para lograr una EC efectiva en la región.

Por otro lado, la utilización de materiales reciclados requiere de tener un control de la disponibilidad y la calidad (Muñoz-Zapata y col., 2022; Wang y col., 2022). Por lo tanto, es importante impulsar tanto la investigación y la innovación tecnológica para la producción de agregados reciclados de alta calidad, como el establecimiento de estándares y certificaciones para garantizar que estos materiales son adecuados para su uso en la construcción, promoviendo así la confianza y la aceptación de estos recursos en la industria.

Adicionalmente, se deben considerar los factores socioeconómicos como la disponibilidad de fuentes de inversión para tecnologías circulares, la educación y conciencia de la importancia de la sostenibilidad (GCCA, 2023; United Nations, 2023). Cabe mencionar que, en un escenario ideal para la EC, se contaría con la colaboración activa de la comunidad local durante el desarrollo de los proyectos.

Asimismo, se requiere de la cooperación entre los países latinoamericanos que permita consolidar los conocimientos, experiencias y las prácticas adecuadas; esto puede impulsar la adopción de soluciones circulares y optimizar tanto los esfuerzos como los recursos disponibles (GCCA, 2023; Maury-Ramírez y col., 2022; Villagrán-Zaccardi y col., 2022). La creación de redes de colaboración regional y la promoción de proyectos en conjunto pueden acelerar la transición hacia una industria más sostenible en Latinoamérica.

5. CONCLUSIONES

Para cumplir con los objetivos sustentables internacionales, la industria del cemento y el concreto en Latino América requiere del enfoque sistematizado de la economía circular para orientar los esfuerzos en educación, investigación, desarrollo tecnológico, infraestructura, marco regulatorio, estandarización, inversión y cooperación regional. Las alternativas a nivel global han demostrado la idoneidad de este enfoque, ya que los diversos modelos resultan en prácticas sostenibles que agregan valor a los materiales de cemento y concreto a través de minimizar las EGEI, la conservación de recursos y minimización de desechos; pero además vuelve más resiliente y económicamente sostenible a la industria y las regiones que lo implementan. Sin embargo, se requiere de la adopción y desarrollo de tecnologías avanzadas, así como de un enfoque de diseño y construcción basados en criterios de optimización y durabilidad, además de una mayor capacitación de los actores involucrados en la industria y la sociedad en general. Por lo tanto, se espera que este trabajo contribuya a la integración entre la economía circular y la industria del cemento y el concreto por medio de la difusión de esta visión.

6. AGRADECIMIENTOS

J. H. Díaz-Aguilera agradece al CONAHCYT por la beca brindada con CVU 929098.

7. REFERENCIAS

- Adesina, A. (2020), *Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions*. Env. Challen. 1:100004. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>
- Adesina, A. (2021). *Circular Economy in the Concrete Industry*, en: Baskar, C., Ramakrishna, S., Baskar, S., Sharma, R., Chinnappan, A., Sehrawat, R. “*Handbook of Solid Waste Management*”, Singapore, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7525-9_64-1
- Akchurin, T. K., Tukhareli, V. D., Yu., O., Pushkarskaya (2016), *The Modifying Additive for Concrete Compositions Based on the Oil Refinery Waste*. Proc. Eng. 150:1485-1490. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.087>
- Al-Hamrani, A., Kucukvar, M., Alnahhal, W., Mahdi, E., Onat, N. C. (2021), *Green Concrete for a Circular Economy: A Review on Sustainability, Durability, and Structural Properties*. Mater. 14(2):351. <https://doi.org/10.3390/ma14020351>
- Al-mousa, E. M., Al-Zboon, K.K. (2022), *Recycling of Nano Silica Waste from Aluminum Fluoride Industry in Cement Mortar*. J. Sol. Was. Tech. Manag. 48(3):459-464. <https://doi.org/10.5276/JSWTM/2022.459>
- Al-Sinan, M. A., Bubshait, A. A. (2022), *Using Plastic Sand as a Construction Material toward a Circular Economy: A Review*. Sust. 14(11):6446. <https://doi.org/10.3390/su14116446>
- Althoey, F., Zaid, O., de-Prado-Gil, J., Palencia, C., Ali, E., Hakeem, I., Martínez-García, R. (2022), *Impact of sulfate activation of rice husk ash on the performance of high strength steel fiber reinforced recycled aggregate concrete*. J. Build. Eng. 54:104610. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104610>
- Amaral, L. P., Martins, N., Gouveia, J.B. (2016), *A review of emergy theory, its application and latest developments*. Ren. Sust. Ene. Rev. 54:882-888. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.048>
- Anastasiades, K., Blom, J., Buyle, M., Audenaert, A. (2020), *Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review*. Ren. & Sust. Ene. Rev. 117:109522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109522>
- Ariza-Figueroa, H. A., Bosch, J., Baltazar-Zamora, M. A., Croche, R., Santiago-Hurtado, G., Landa-Ruiz, L., Mendoza-Rangel, J. M., Bastidas, J. M., Almeraya-Calderón, F., Bastidas, D. M. (2020), *Corrosion Behavior of AISI 304 Stainless Steel Reinforcements in SCBA-SF Ternary Ecological Concrete Exposed to MgSO₄*. Mater. 13(10):2412. <https://doi.org/10.3390/ma13102412>
- Atta, I., Bakhoun, E. S., Marzouk, M. M. (2021), *Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM*. J. Build. Eng. 43:103233. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233>
- Barreto, E. S., Stafanato, K. V., Marvila, M. T., Garcez de Azevedo, A. R., Ali, M., Pereira, R. M. L., Monteiro S. N. (2021), *Clay Ceramic Waste as Pozzolan Constituent in Cement for Structural Concrete*. Mater. 14(11):2917. <https://doi.org/10.3390/ma14112917>
- Bourke, K., Kyle, B. (2019), *Service life planning and durability in the context of circular economy assessments — initial aspects for review*. Can. J. Civ. Eng. 46(11):1074-1079. <https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0596>
- Caldas, L. R., Saraiva, A. B., Lucena, A. F. P., Da Gloria, M. Y., Santos, A. S., Filho, R. D. T. (2021), *Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO₂-sink in bio concrete*. Res. Cons. Recyc. 166:105346. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>

- Camilleri, M. A. (2020), *European environment policy for the circular economy: Implications for business and industry stakeholders*. *Sust. Dev.* 28(6):1804-1812. <https://doi.org/10.1002/sd.2113>
- Castro-Borges, P., Helene, P. (2007), *Service Life of Reinforced Concrete Structures. New Approach*. in *Corrosion of Infrastructure*. Cancun, México: ECS Transactions.
- Chakartnarodom, P., Wanpen, S., Prakaypan, W., Laitila, E. A., Kongkajun N. (2022), *Development of High-Performance Fiber Cement: A Case Study in the Integration of Circular Economy in Product Design*. *Sust.* 14(19):12263. <https://doi.org/10.3390/su141912263>
- Chatterjee, A. Sui, T. (2019), *Alternative fuels – Effects on clinker process and properties*. *Cem. Concr. Res.* 123:105777. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105777>
- Colangelo, F., Navarro, T. G., Farina, I., Petrillo A. (2020), *Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe*. *Inter. J. of LCA.* 25:1790-1804. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01798-6>
- Colorado, H. A., Velásquez, E. I. G. Monteiro, S. N. (2020), *Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives*. *J. Mater. Res. Tech.* 9(4):8221-8234. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062>
- Contrafatto, L. (2017), *Recycled Etna volcanic ash for cement, mortar and concrete manufacturing*. *Constr. Build. Mater.* 151:704-713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.125>
- Corvellec, H., Stowell, A. F., Johansson, N., (2022). *Critiques of the circular economy*. *J. Indus. Eco.* 26(2):421-432. <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>
- Cosentino, I., Liendo, F., Arduino, M., Restuccia, L., Bensaid, S., Deorsol, F., Ferro, G. A. (2020), *Nano CaCO₃ particles in cement mortars towards developing a circular economy in the cement industry*. *Proc. Struc. Int.* 26:155-165. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.019>
- Delwar, M., Fahmy, M., Taha, R. (1997), *Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete*. *Mater. J.* 94(3):251-256. <https://doi.org/10.14359/306>
- Díaz-Aguilera, J. H., Rodríguez-Reyna, S. L., Flores-Véles, L. M., Dominguez, O. (2021), *Improvement of Mechanical Behavior of Rubber–Cement Mortars by Catalytic Hydration*. *J. Mater. Civ. Eng.* 33(10):04021282. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003897](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003897)
- Dikshit, A. K., Sahoo, B. B., Gupta, S. K., Chaturvedi, S. K. (2022). “A study on utilization of paper mill lime sludge in the manufacture of cement under circular economy” in: *International Conference on Cement, Concrete and Building Materials, 17th National Council for Cement and Building Materials, New Dheli (India)*, pp. 1-6.
- Fay, L., Cooper, P., de Morais, H. F. (2014), *Innovative interlocked soil–cement block for the construction of masonry to eliminate the settling mortar*. *Constr. Build. Mater.* 52:391-395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.030>
- Fořt, J., Černý, R. (2020), *Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios*. *Was. Manag.* 118:510-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.004>
- Gallaud, D., Laperche, B. (2016), “*Circular Economy, Industrial Ecology and Short Supply Chain*”. John Wiley & Sons Inc, London, U.K.
- Geisendorf, S., Pietrulla, F. (2018), *The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition*. *Thund. Inter. Buiss. Rev.* 60(5):771-782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>
- Ghosh, S. K., Kumar, V. (2020), “*Circular Economy and Fly Ash Management*”. Springer, Singapore, 2020.
- Global Cement and Concrete Association (GCCA) (2023), *GCCA and FICEM Take Next Steps to Accelerate Regional Net Zero Progress at LatAm and the Caribbean Climate Week*. Accedido el 8 de junio de 2023 en: <https://gccassociation.org/news/gcca-and-ficem-take-next-steps-to-accelerate-regional-net-zero-progress-at-latam-and-the-caribbean-climate-week/>

- González-Domínguez, J., Sánchez-Barroso, G., Zamora-Polo, F., García-Sanz-Calcedo, J. (2020), *Application of Circular Economy Techniques for Design and Development of Products through Collaborative Project-Based Learning for Industrial Engineer Teaching*. *Sust.* 12(11):4368. <https://doi.org/10.3390/su12114368>
- Guimarães, A. S., Delgado, J. M. P. Q., Lucas S. S. (2021), *Additive Manufacturing on Building Construction*. *Def. Dif. For.* 412:207–216. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.412.207>
- Hamam, M., Chinnici, G., Di Vita, G., Pappalardo, G., Pecorino, B., Maesano, G., D’Amico, M. (2021), *Circular Economy Models in Agro-Food Systems: A Review*. *Sust.* 13(6):3453. <https://doi.org/10.3390/su13063453>
- Hanif, M., Agarwal, R., Sharma, U., Thapliyal, P. C., Singh, L. P. (2023), *A review on CO2 capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies*. *J CO2 Util.* 67:102292. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102292>
- Hentges, T. I., da Motta, E. A. M., Fantin, T. V. L., Moraes, D., Fretta, M. A., Pinto, M. F., Böes, J. S. (2021), *Circular economy in Brazilian construction industry: Current scenario, challenges and opportunities*. *Was. Manag. Res.* 40(6):642-653. <https://doi.org/10.1177/0734242X211045014>
- Hossain, M. U., Ng, S. T., Antwi-Afari, P., Ben Amor (2020), *Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction*. *Ren. Sust. Ener. Rev.* 130:109948. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>
- Iacovidou, E., Millward-Hopkins, J., Busch, J., Purnell, P., Velis, C. A., Hahladakis, J. N., Zwirner, O., Brown, A. (2017), *A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste*. *J. Clean. Prod.* 168:1279-1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.002>
- Juárez-Alvarado, C. A., Magniont, C., Escadeillas, G., Terán-Torres, B. T., Rosas-Díaz, F., Valdez-Tamez, P. L. (2020), *Sustainable Proposal for Plant-Based Cementitious Composites, Evaluation of Their Mechanical, Durability and Comfort Properties*. *Sust.* 14:14397. <https://doi.org/10.3390/su142114397>
- Kaliyavaradhan, S. K., Tung-Chai, L., Mo, K. H. (2020), *CO2 sequestration of fresh concrete slurry waste: Optimization of CO2 uptake and feasible use as a potential cement binder*. *J. CO2 Util.* 42:101330. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101330>
- Karlsson, I., Rootzén, J., Johnsson, F. (2020), *Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains – Analysis of a Swedish road construction project*. *Ren, Sust. Ene. Rev.* 120:109651. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109651>
- Kosmatka, S. H., Wilson, M. L. (2004), “*Design and control of concrete mixtures*”, Portland Cement Association, Illinois, USA.
- Lederer, J., Gassner, A., Kleemann, F., Fellner J., (2020), *Potentials for a circular economy of mineral construction materials and demolition waste in urban areas: a case study from Vienna*. *Res. Cons. Recy.* 161:104942. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104942>
- Liew, K. M., Akbar, A. (2020), *The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete*. *Constr. Build. Maters.* 232:117232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>
- Linek, M., Bacharz, M., Piotrowska, P. (2023), *Surface Cement Concrete with Reclaimed Asphalt*. *Maters.* 16(7):2791. <https://doi.org/10.3390/ma16072791>
- Londoño, N. A. C., Cabezas, H. (2021), *Perspectives on circular economy in the context of chemical engineering and sustainable development*. *Cur. Opin. Chem. Eng.* 34:100738. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100738>
- Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., Bernal, S. A. (2022), *Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration*. *J. Clean. Produc.* 362:132486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>

- Mathews, J. A., Tan, H. (2011), *Progress Toward a Circular Economy in China: The Drivers (and Inhibitors) of Eco-industrial Initiative*. J. Ind. Eco. 15(3):435-457. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00332.x>
- Maury-Ramírez, A., Illera-Perozo, D., Mesa, J. A. (2022), *Circular Economy in the Construction Sector: A Case Study of Santiago de Cali (Colombia)*. Sust. 14(3):1923. <https://doi.org/10.3390/su14031923>
- Minunno, R., O’Grady, T., Morrison, G. M., Gruner, R. L., Colling, M. (2018), *Strategies for Applying the Circular Economy to Prefabricated Buildings*. Build. 8(9):125. <https://doi.org/10.3390/buildings8090125>
- Mostert, C., Sameer, H., Glanz, D., Bringezu, S. (2021), *Climate and resource footprint assessment and visualization of recycled concrete for circular economy*. Resour. Cons. & Recy. 174:105767. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105767>
- Muñoz-Zapata, A., Cifuentes-Mosqueda, S. (2022), *Portland Cement Mortars Tested with Two Superplasticizers: A Case Study to Reduce Cement and Water in Concrete*. Tecn. 26(72):114-146. <https://doi.org/10.14483/22487638.16824>
- Neves, J., Freire, A. C. (2022), *Special Issue “The Use of Recycled Materials to Promote Pavement Sustainability Performance”*. Recyc. 7(2):12. <https://doi.org/10.3390/recycling7020012>
- Nodehi, M., Taghvaei, V. M. (2022), *Sustainable concrete for circular economy: a review on use of waste glass*. G. Struc. & Eng. 7:3-22. <https://doi.org/10.1007/s40940-021-00155-9>
- NoParast, M., Hematian, M., Ashrafi, A., Amiri, M. J. T., Jafari, H. A. (2021), *Development of a non-dominated sorting genetic algorithm for implementing circular economy strategies in the concrete industry*. Sust. Prod. & Cons. 27:933-946. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.009>
- Pérez, J. L., González-Fontes, B., Martínez-Abella, F. (2009), *“EC Techniques in the Structural Concrete Field”*, IGI Global.
- Pérez-Cortés, P., Escalante-García, J. I. (2020), *Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaoline A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers*. J. Crean. Prod. 273:123118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123118>
- Phiri, T. C., Singh, P., Nikoloski, A. N. (2021), *The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part II*. Min. Eng. 172:107150. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107150>
- Rada, R., Manea, D. L., Chelcea, R., Rada, S. (2023), *Nanocomposites as Substituent of Cement: Structure and Mechanical Properties*. Maters. 16(6):2398. <https://doi.org/10.3390/ma16062398>
- Romero, C. A. T., Castro, D. F., Ortiz, J. H., Khalaf, O. I., Vargas, M. A. (2021), *Synergy between Circular Economy and Industry 4.0: A Literature Review*. Sust. 13(8):4331. <https://doi.org/10.3390/su13084331>
- Rossignolo, J. A., Duran, A. J. F. P., Bueno, C., Filho, J. E. M., Junior, H. S., Tonin, F. G. (2022), *Algae application in civil construction: A review with focus on the potential uses of the pelagic Sargassum spp. biomass*. J. Env. Manag. 303:114258. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114258>
- Roychand, R., Patel, S., Halder, P., Kundu, S., Hampton, J., Bergmann, D., Surapaneni, A., Shah, K., Pramanik, B. K. (2021), *Recycling biosolids as cement composites in raw, pyrolyzed and ashed forms: A waste utilisation approach to support circular economy*. J. Build. Eng. 38:102199. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102199>
- Şahin, H. G., Mardani-Aghabaglou, A. (2022), *Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review*. Constr. Build. Maters. 316:125865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125865>

- Sehnm, S., Vasquez-Brust, D., Pereira, S. C. F., Campos, L. M. S. (2019), *Circular economy: benefits, impacts and overlapping*. Sup. C. Manag. Inter. J. 24(6):784-804. <https://doi.org/10.1108/SCM-06-2018-0213>
- Sharifikolouei, E., Ferraris, M. (2021), Potential Role of Vitrification and Waste Vitrification in the Circular Economy. En: Baino, F., Tomalino, M., Tulyaganov, D. “*Ceramics, Glass and Glass-Ceramics. PoliTO Springer Series*”, Cham, Springer.
- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D. (2006), “*Alkali-Activated Cements and Concretes*”, Taylor and Francis Group, London, U.K.
- Sudarsan, J. S., Gavali, H. (2023), *Application of BIM in conjunction with circular economy principles for sustainable construction*. Envir. Dev. Sust. 2:2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03015-4>
- Taghvaei, V. M., Nodehi, M. (2022), *Applying Circular Economy to Construction Industry through Use of Waste Materials: A Review of Supplementary Cementitious Materials, Plastics, and Ceramics*. Cir. Eco. & Sust. 2:987-1020. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00149-x>
- Tari, H., Siddique, R. M. A., Shah, S. A. R., Azab, M., Attiq-Ur-Rehman, Qadeer, R., Ullah, M. K., Iqbal, F. (2022), *Mechanical Performance of Polymeric ARGF-Based Fly Ash-Concrete Composites: A Study for Eco-Friendly Circular Economy Application*. Pol. 14(9):1774. <https://doi.org/10.3390/polym14091774>
- Taylor, H. F. W. (1997), “*Cement chemistry*”, Thomas Telford Services Ltd, London, U.K.
- Uluslu, H., Aruntaş, H. Y., Gültekin, A. B., Dayı, M., Çavuş, M., Kaplan, G. (2023), *Mechanical, durability and microstructural characteristics of Portland pozzolan cement (PPC) produced with high volume pumice: Green, cleaner and sustainable cement development*. Consfr. Build. Maters. 378:131070. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131070>
- United Nations (2023), *The 17 goals, sustainable development*. Accedido el 12 de julio de 2023 en <https://sdgs.un.org/goals>
- Van Breugel, K. (2017). “*Ageing Infrastructure and Circular Economy: Challenges and Risks*”, in: Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, CSEE’17, Barcelona (España), pp. 1-8.
- Van Dam, K., Simeone, L., Keskin, D., Baldassarre, B., Niero, M., Morelli, N. (2020), *Circular Economy in Industrial Design Research: A Review*. Sust. 12(24):10279, <https://doi.org/10.3390/su122410279>
- Van Wijk, A., Van Wijk, I. (2015), “*3D Printing with biomaterials: Towards a sustainable and circular economy*”, IOS Press - Delft University Press, Amsterdam, Netherlands.
- Velvizhi, G., Shanthakumar, S., Das, B., Pugazhendhi, A., Priya, T. S., Ashok, B., Nanthagopal, K., Vignesh, R., Karthick, C. (2020), *Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy*. Sci. T. Env. 731:138049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138049>
- Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-Acosta, A., Tobón, J., John, V. M. (2022), *Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality*. RILEM techn. Let. 7:30-46. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155>
- Vitale, P., Napolitano, R., Colella, F., Menna, C., Asprone, D. (2021), *Cement-Matrix Composites Using CFRP Waste: A Circular Economy Perspective Using Industrial Symbiosis*. Maters. 14(6):1484. <https://doi.org/10.3390/ma14061484>
- Wang, H., Liu, Y., Zhang, J., Zhang, H., Huang, L., Xu, D., Zhang, C. (2022), *Sustainability Investigation in the Building Cement Production System Based on the LCA-Emergy Method*. Sust. 14(24):16380. <https://doi.org/10.3390/su142416380>

- Xavier, L. H., Giese, E. C., Ribeiro-Duthie, A. C., Lins, F. A. F. (2021), *Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining*. Res. Pol. 74:101467. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>
- Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Pow-Seng, Y. (2022), *Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues*. Env. Chem. Let. 21:55-80. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
- Yousef, S., Kalpokaitė-Dičkuvienė, R., Baltušnikas, A., Pitak, I., Lukošiuūtė, S. I. (2021), *A new strategy for functionalization of char derived from pyrolysis of textile waste and its application as hybrid fillers (CNTs/char and graphene/char) in cement industry*. J. Clean. Prod. 314:128058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128058>
- Zajac, M., Skocek, J., Ben Haha, M., Deja, J. (2022), *CO2 Mineralization Methods in Cement and Concrete Industry*. Ener. 15(10):3597. <https://doi.org/10.3390/en15103597>
- Zhang, J., Lv, T., Hou, D., Dong, B. (2023), *Synergistic effects of fly ash and MgO expansive additive on cement paste: Microstructure and performance*. Constr. Build. Mater. 371:130740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130740>