

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

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

RESUMO

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 industria 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.

Palavras-chave: economía circular; sustentabilidad; industria de cemento e concreto; proyecto eficiente; durabilidad.

Citar como: Mendoza-Rangel, J. M., Díaz-Aguilera, J. H. (2023), “Economía circular na indústria latino-americana de cimento e concreto: uma solução sustentável de projeto, durabilidade, materiais e processos”, 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 en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos

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.

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. INTRODUÇÃO

No contexto global, é urgente reduzir os problemas associados às alterações climáticas, que envolvem a atividade de diferentes indústrias, incluindo a do cimento e do concreto (Adesina, 2020; Villagrán-Zaccardi et al., 2022; Zajac et al., 2022). Uma das diretrizes para atingir esse objetivo são os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da agenda 2030 (United Nations, 2023), entre os quais existem alguns relacionados com a necessidade de promover a sustentabilidade na indústria do cimento e do concreto (ICC). O ODS 6 de água potável e saneamento envolve a otimização do uso de recursos hídricos nos processos de produção e construção (Muñoz-Zapata et al., 2022; Nodehi et al., 2022; United Nações, 2023). O ODS 7 promove o acesso sustentável à energia, o que implica a redução das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) associadas à produção de materiais de construção, como o cimento (Colangelo et al., 2020). O ODS 9 incentiva a inovação e a infraestrutura sustentáveis, o que inclui a promoção de tecnologias verdes e eficientes na produção de cimento e concreto (GCCA, 2023; NoParast et al., 2021). O ODS 11 centra-se em alcançar cidades e comunidades sustentáveis, o que tem impacto nas práticas de construção, na pegada de carbono associada aos edifícios e infraestruturas, no planeamento de sistemas de transporte, no desenho urbano, nos edifícios energeticamente eficientes e nas soluções de mobilidade sustentáveis (Mostert et al., 2021). O ODS 12 visa alcançar modelos sustentáveis de produção-consumo, ou seja, a redução da utilização de materiais não renováveis e alternativas como a utilização de cimentos com menor teor de clínquer (Geisendorf et al., 2018; GCCA, 2023). O ODS13 está relacionado com a promoção de propostas para reduzir os efeitos das alterações climáticas; por exemplo: a diminuição dos EGEIs associados ao cimento e ao concreto (Maury-Ramírez et al., 2022; United Nações, 2023). O ODS 15 está associado aos processos de obtenção de matérias-primas, reabilitação de pedreiras, proteção e restauração da biodiversidade (Adesina, 2020; Villagrán- Zaccardi et al., 2022). Da mesma forma, o ODS 17 incentiva a criação de alianças para alcançar os ODS; por exemplo, colaboração entre diferentes atores para o desenvolvimento de pesquisa e tecnologia sustentável para materiais de construção (Marsh et al., 2022).

Por outro lado, a América Latina concentra uma diversidade de países em desenvolvimento, o que leva à necessidade de construção de infraestrutura em diferentes escalas e ao consequente consumo de grandes volumes de cimento e concreto (Zajac et al., 2022). Em termos de capacidade instalada, as fábricas de cimento da região atingem 271 Mt, mas a produção foi de 170 Mt em 2019; dos quais 68% foram distribuídos em sacos, 25% em concreto pronto, 2% em concreto pré-moldado e 5% em outras formas (argamassas etc.). De referir que o cenário óptimo esperado para 2020, 2030 e 2050 é um aumento na produção de 196, 198 e 227 Mt; contudo, o fator Clínquer deverá ser reduzido para 0,66, 0,53 e 0,51, respetivamente (GCCA, 2023). Estas reduções são interessantes porque envolvem: i) uma exploração significativa de recursos naturais, como água, calcário, argila, areia etc. (Nodehi et al., 2022); ii) Emissões de CO₂ e consumo de energia devido à decomposição térmica de calcário, máquinas de mineração, transporte etc. (Colangelo et al., 2020; NoParast et al., 2021); e iii) a geração de resíduos como resíduos de construção, produtos de demolição etc. (Mostert et al., 2021). Portanto, segundo a Federação Interamericana do Cimento (FICEM), para atingir a meta de zero emissões de CO₂, espera-se que 110 Mt em 2020 sejam reduzidos para 0 Mt até 2050, o que exigirá a implementação de diversas tecnologias e estratégias. como a utilização de materiais cimentícios complementares, o desenvolvimento de novos materiais cimentícios, tornando mais eficiente o projeto e a construção com concreto, tecnologias de captura de carbono e obtenção de materiais com valor agregado como a recarbonatação de resíduos industriais, minerais naturais e outros (Villagrán - Zaccardi et al., 2022; Zajac et al., 2022).

Face aos desafios acima descritos, surge a proposta da economia circular (EC), que se baseia na avaliação do ciclo de vida dos materiais e processos de forma a maximizar a relação entre o valor do produto e o impacto ambiental a longo prazo. (GCCA, 2023). Isto incentiva um caminho circular

de produção-consumo-gestão para que os materiais de construção permaneçam em uso durante o maior tempo possível, em vez do modelo linear de exploração de recursos naturais, produção de um produto, utilização e descarte (Geisendorf et al., 2018). Algumas estratégias dessa abordagem são (Corvellec et al., 2022; Romero et al., 2021; Sehnem et al., 2019): i) otimização de recursos, ou seja, a redução de desperdícios ou recursos utilizados indevidamente durante a produção e uso de cimento e concreto; ii) reutilização e reciclagem, o que favorece o encerramento da vida útil de materiais provenientes da ICC ou de outras indústrias; iii) regeneração, que envolve prolongar o ciclo de vida dos materiais. Desta forma, o CE permite ao ICC adaptar-se, recuperar e responder eficazmente aos desafios ambientais e socioeconômicos, prosperando num contexto em mudança e aproveitando as oportunidades oferecidas pela transição para práticas mais sustentáveis, assegurando e mantendo a sua funcionalidade de forma sustentada, ao longo do tempo.

Contudo, os princípios da EC e a sua implementação na ICC ainda não estão completamente difundidos na América Latina; isso é demonstrado pela pouca literatura científica relatada por institutos de pesquisa da região que foi encontrada para a realização deste trabalho (Caldas et al., 2021; Colorado et al., 2020; Hentges et al., 2021; Londoño et al., 2021; Maury-Ramírez et al., 2022; Muñoz-Zapata et al., 2022; Xavier et al., 2021). Adicionalmente, é necessário apresentar a informação com uma abordagem tanto geral como particular, sendo este o primeiro de uma série de artigos que apresentam as pessoas envolvidas na ICC independentemente de pertencerem ao meio científico-acadêmico, empresarial, técnico ou estudantil. Com estes trabalhos, esperamos contribuir para a divulgação, discussão e promoção desta tendência internacional na América Latina, lançar as bases para estimular e potenciar o seu desenvolvimento, bem como catalisar um impacto em larga escala na região. Nas seções seguintes, os fundamentos da EC são discutidos e uma classificação é proposta para pesquisas internacionais em sete áreas de implementação no ICC: 1) Digitalização do concreto, 2) Inovações tecnológicas, 3) Projeto eficiente, 4) Agregados reciclados, 5) Extensão da vida útil, 6) Recursos locais, 7) Processos eficientes; posteriormente, é realizada uma análise da aplicabilidade da EC nas ICC latino-americanas.

2. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA ECONOMIA CIRCULAR

Os princípios fundamentais da economia circular (EC) estão relacionados com os 5Rs (Reduzir, Reutilizar, Reciclar, Recuperar, Redesenhar) e procuram transformar a forma como produzimos e consumimos recursos através de uma visão abrangente que aborda os desafios ambientais e económicos, com o objetivo de alcançar indústrias mais sustentáveis e resilientes; como foi relatado para as indústrias: 4.0 (Romero et al., 2021), mineração (Xavier et al., 2021), impressão 3D de biomateriais (Wijk et al., 2015), processamento de alimentos (Hamam et al., 2015) . . . , 2021), desenho industrial (Dam et al., 2020) e outros (Gallaud et al., 2016; González-Domínguez et al., 2020; Londoño et al., 2021). Nestes casos, as melhorias estiveram relacionadas com a gestão eficiente das matérias-primas naturais e da quantidade de resíduos; o que sugere que o TPI também pode tirar partido desta abordagem. Os princípios da EC podem ser resumidos em quatro:

- 1) A regeneração dos sistemas naturais (Romero et al., 2021; Wijk et al., 2015; Xavier et al., 2021): em vez de esgotar os recursos naturais e deteriorar os ecossistemas, a EC propõe uma integração harmoniosa com a natureza através do uso consciente dos recursos renováveis e não renováveis do planeta. Isto significa conceber produtos e processos que regenerem e restaurem os recursos naturais, em vez de os degradarem.
- 2) Otimização do uso de recursos (Hamam et al., 2021; Sehnem et al., 2019): implica no uso eficiente de materiais e na geração mínima de resíduos, por isso busca a utilização de materiais duráveis e de qualidade, bem como tecnologias e processos que otimizam resíduos.
- 3) Circularidade (Gallaud et al., 2016): é manter os materiais em uso pelo maior tempo possível, o que envolve a reutilização, reparo, remanufatura e reciclagem de materiais, além do design de

produtos modulares e fáceis de fabricar, desmantelar; isso torna os procedimentos de reparo e manutenção mais eficientes. Da mesma forma, permite a recuperação e reintegração de materiais num próximo ciclo produtivo.

4) Colaboração e criação de sinergias: de forma a maximizar benefícios através da troca de conhecimento, diversificação de soluções e utilização dos recursos disponíveis; propõe alianças entre empresas, governos, organizações da sociedade civil, consumidores etc. (Camilleri et al., 2020; Corvellec et al., 2022).

2.1. Os 5Rs da economia circular

Os 5Rs são definidos da seguinte forma (Corvellec et al., 2022; Marsh et al., 2022):

- a) Reduzir recursos, resíduos industriais e emissões associadas à produção de um material; portanto, trata-se de otimizar os processos de fabricação e o consumo de energia, bem como integrar critérios de projeto para durabilidade. Por exemplo: trata-se de reduzir o consumo de cimento associado à produção de concreto, otimizando misturas e utilizando aditivos para atingir as propriedades especificadas pelo projeto (NoParast et al., 2021; Velvizhi et al., 2020).
- b) Reutilizar materiais no final do seu ciclo de vida em vez de os deitar fora, o que pode implicar reparação para a sua reintegração no mercado. Um exemplo é a reutilização de estruturas de concreto existentes, como pontes ou edifícios, reabilitando-as e adaptando-as para novos usos em vez de demolir ou reconstruir (Maury-Ramírez et al., 2022).
- c) A reciclagem envolve transformar resíduos em produtos de valor para uma indústria, reduzindo a extração de matérias-primas. Isto pode levar à reciclagem de águas residuais provenientes da produção e lavagem de concreto através de sistemas de tratamento e purificação (Maury-Ramírez et al., 2022).
- d) Recuperar é obter recursos valiosos a partir de resíduos cuja reciclagem não é viável, como matérias-primas, energia elétrica ou térmica. Assim, é possível recuperar resíduos de outras indústrias para a fabricação de cimento, como cinzas volantes ou escórias (Roychand et al., 2021).
- e) Renovar é restaurar a funcionalidade dos materiais; pode exigir processos de remanufatura. Em estruturas de concreto, as propriedades de durabilidade dos elementos expostos a ambientes corrosivos podem ser restauradas através de técnicas de extração de íons cloreto, o que reduz a corrosão da armadura e prolonga seu ciclo de vida (Kosmatka et al., 2004; Taylor, 1997).

3. MODELOS DE ECONOMIA CIRCULAR APLICADOS À INDÚSTRIA DE CIMENTO E CONCRETO

Para discutir a integração da CE nas ICC é necessário conhecer alguns modelos propostos na literatura, entre os quais se destaca o trabalho de Maury-Ramírez et al. (2022) que avalia os processos da indústria da construção com o objetivo de melhorá-los a partir da análise do processo de exploração de matérias-primas e de fabricação de materiais de construção, da etapa de construção da infraestrutura, do uso e operação do imóvel, bem como o fim da vida útil que inclui a geração de resíduos e sua disposição final em aterro ou reciclagem dentro desta ou de outra indústria (Figura 1). Este modelo foi utilizado em Santiago de Cali (Colômbia), mas poderia ser estendido a variáveis relacionadas ao cimento e ao concreto, envolvendo as etapas de produção, projeto, construção, utilização, manutenção e gestão de fim de vida.

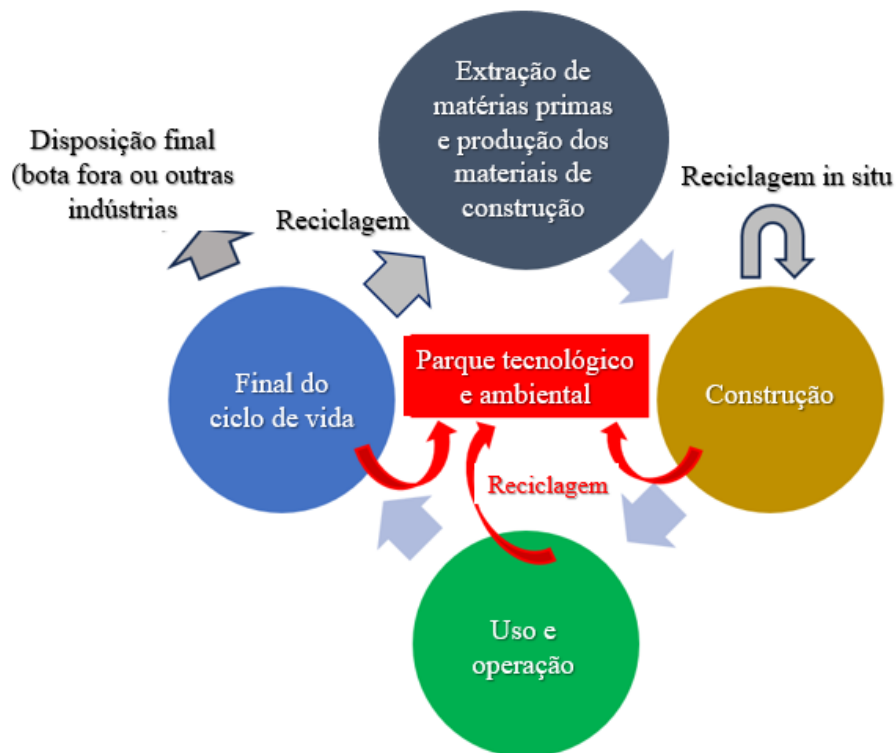


Figura 1. Modelo de extração, construção, operação e gestão de resíduos em obras baseadas na economia circular.

Deve-se notar que os modelos propostos exigirão a colaboração das partes envolvidas na cadeia de valor das ICC para cumprir o seu propósito, incluindo fabricantes, empreiteiros, projetistas, órgãos reguladores e consumidores (Corvellec et al., 2022; Marsh et al., 2022). Da mesma forma, é necessário incentivar a *feedback* de ideias entre os diferentes setores participantes (industriais, instituições acadêmicas, organizações governamentais e sociedade civil); que impulsionará a inovação, o desenvolvimento tecnológico e as boas práticas industriais. Da mesma forma, são necessários marcos regulatórios e políticas públicas que favoreçam a transição para uma EC nas ICC, como incentivos fiscais, apoio à pesquisa e ao progresso dos avanços tecnológicos, padrões de sustentabilidade, regulamentações ambientais e programas de formação (Marsh et al., 2022; Villagrán- Zaccardi et al., 2022). A implementação bem-sucedida de modelos de EC não só contribuirá para a redução dos impactos ambientais, como também gerará oportunidades econômicas, como a criação de emprego nos setores de investigação e gestão de resíduos, a produção baseada em materiais reciclados e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e de materiais mais duradouros. Abaixo descrevemos sete áreas de implementação de EC na ICC e algumas pesquisas relacionadas a cada área.

3.1 Digitalização de cimento e concreto

A digitalização oferece a possibilidade de otimizar a composição química dos cimentos e a formulação das misturas de concreto, minimizando o desperdício de materiais e melhorando seu desempenho tanto em volumetria quanto nas propriedades resultantes (NoParast et al., 2021). Para alcançar tal controle, são necessários diferentes tipos de sensores (Marsh et al., 2022; Maury-Ramírez et al., 2022) para monitorar em tempo real (Hossain et al., 2020; Velvizhi et al., 2020) e modelar processos de produção de cimento (Atta et al., 2021), como moagem e calcinação; além de tornar mais eficiente a mistura, o transporte e a colocação do concreto, o que exige melhorias tecnológicas em caminhões misturadores, bombas de concreto e outros equipamentos (Adesina, 2021). Por exemplo, sensores coletam dados sobre as características de interesse do cimento ou

concreto (temperatura, umidade, resistência, fluidez, emissões de gases de efeito estufa ou consumo de energia do processo etc.) que são transmitidos para uma plataforma digital para análise (Marsh et al., 2022; Maury-Ramírez et al., 2022; Velvizhi et al., 2020). Além disso, a digitalização facilita a otimização da dosagem dos ingredientes e seu ajuste em tempo real (NoParast et al., 2021; Velvizhi et al., 2020).

Outra vantagem é que permite o rastreamento de materiais (rastreadibilidade) e a gestão eficiente do processo de fornecimento por meio do acompanhamento das atividades desde a planta de produção até o canteiro de obras, o que inclui conhecimento preciso dos volumes utilizados, prazos de entrega e outras variáveis. M. NoParast et al. (2021) desenvolveram um modelo para otimizar a cadeia de fabricação e fornecimento de concreto que consiste na análise de diferentes subsistemas: clientes, fornecedores, bem como locais de fabricação e reciclagem. O objetivo era minimizar a extração de matérias-primas, o custo de transporte e as emissões de gases de efeito estufa (Figura 2).

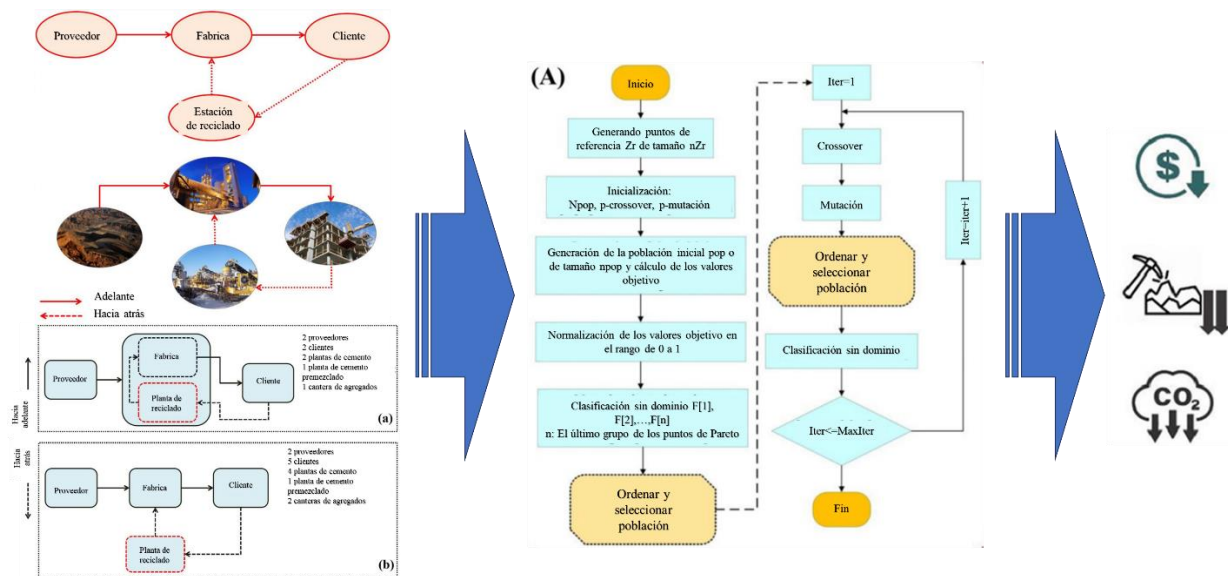


Figura 2. Modelo aplicado a atividades concretas de fornecimento baseadas na economia circular (NoParast et al., 2021).

Por outro lado, a Informação de Construção Modelagem (BIM) e impressão 3D são componentes importantes da digitalização. A primeira é uma metodologia que permite criar modelos digitais tridimensionais de edifícios, infraestruturas e projetos de construção, que contêm informação detalhada sobre elementos construtivos como parâmetros de projeto, tipo de concreto, dimensões das estruturas e localização no edifício. instalações etc. (Sudarsan et al., 2023). Assim, o BIM permite otimizar o planejamento, a concepção e a gestão do projeto, que é afetado pelas variáveis associadas à utilização do cimento e do concreto na logística de abastecimento, na simulação e análise estrutural, nos procedimentos construtivos etc.; isso permite uma melhor tomada de decisão que reduz erros durante a construção (Atta et al., 2021). Ressalta-se que o BIM facilita a comunicação e a colaboração entre os atores do projeto porque permite o acesso e a atualização das informações do modelo em tempo real (Atta et al., 2021; Sudarsan et al., 2023), otimizando o uso de cimento e concreto, resíduos e tempos de construção. I. Atta et al. (2021) propuseram um método de design sustentável baseado na ferramenta Material Passport (MP) (Figura 3), que requer parâmetros de entrada como ferramentas para avaliação de sustentabilidade, detalhes técnicos do material e estabelecimento de indicadores para determinar a disposição final; Com esses dados é desenhado o MP, que é digitalizado em BIM e as informações são processadas para validar as características de fabricação e o estudo de caso específico onde o material será utilizado.

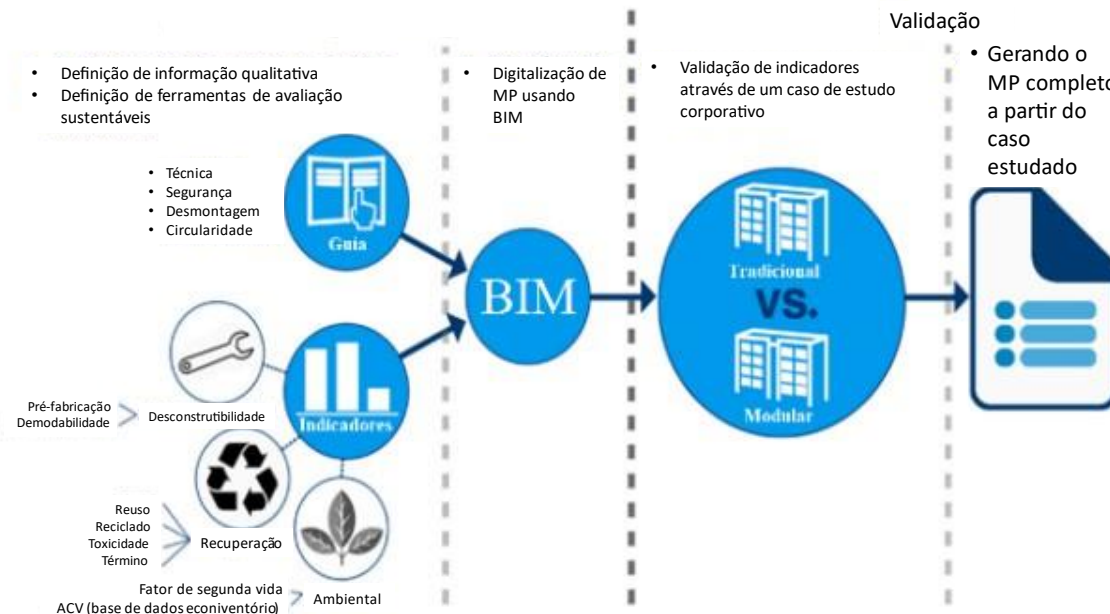


Figura 3. Projeto de concreto sustentável usando Material Passport (Atta et al., 2021).

A impressão 3D (manufatura aditiva) permite criar objetos tridimensionais camada por camada a partir de um design digital (Wijk et al., 2015). No contexto do cimento e do concreto, este método permite a fabricação automatizada de elementos estruturais e arquitetônicos de forma precisa, com maior eficiência em termos de concepção, planejamento e construção de projetos, em comparação às técnicas tradicionais (Colorado et al., 2020; Şahin et al., 2022).

Em resumo, a digitalização do cimento e do concreto aproveita a tecnologia para melhorar o controle de qualidade, eficiência e rastreabilidade na vida útil projetada, o que promove maior controle das propriedades, evitando a superprodução e garantindo os requisitos específicos de uma obra, tudo o que reduz o impacto ambiental pegada.

3.2. Inovações tecnológicas na construção

A adoção de inovações tecnológicas como a impressão 3D (Şahin et al., 2022), o uso de materiais avançados (Chakartnarodom et al., 2022; Colorado et al., 2020) e a pré-fabricação (Minunno et al., 2018), otimiza utilização de recursos. A vasta gama de materiais avançados oferece propriedades superiores ao concreto convencional que melhoram as propriedades mecânicas e de durabilidade através de diferentes mecanismos físicos e químicos, contribuindo para a sua eficiência e sustentabilidade no contexto da CE. Alguns exemplos são fibras de reforço (Tari et al., 2022), nanomateriais (Cosentino et al., 2020) e aditivos especiais (Dikshit et al., 2022). Os primeiros podem ser feitos de aço (Liew et al., 2020), vidro (Tari et al., 2022) ou polímero (Vitale et al., 2021), e são capazes de reduzir fissuras sob cargas impostas; além disso, podem substituir ou reduzir a quantidade de vergalhões de aço nas estruturas de concreto (Liew et al., 2020), o que reduz o consumo de recursos naturais. Devem ser mencionadas fibras de origem natural como o bagaço de cana (Rossignolo et al., 2022) ou o agave (Juárez-Alvarado et al., 2020), pois podem melhorar as propriedades térmicas e de conforto dos blocos de concreto. Por outro lado, nanomateriais como os nanotubos de carbono (Yousef et al., 2021) ou a nanosílica (Almoussa et al., 2022), reduzem a porosidade da matriz cimentícia, resultando numa menor difusividade dos agentes agressivos que deterioram o concreto ou as armaduras. aço. Outra inovação de interesse são os cimentos ativados alcalinos, que podem substituir o uso do cimento Portland em algumas

aplicações onde são necessários elementos pré-fabricados com maior resistência a meios agressivos ou alta resistência mecânica em menor tempo de pega (Shi et al., 2006). Embora possam ser feitos a partir de resíduos como escória, cinza volante e lama de bauxita, destacam-se aqueles feitos com metacaulim e calcário; isto se deve à semelhança de suas matérias-primas com o cimento Portland, mas com a vantagem de que a transformação caulim-metacaulim pode ser realizada em aproximadamente metade da temperatura do Clínquer e o calcário não necessita de calcinação, apenas pulverizado. Além disso, foi recentemente relatado que o uso de ativadores alcalinos silicato de sódio e hidróxido de sódio pode ser otimizado, o que reduz ainda mais o impacto ambiental, o custo e a energia de produção em relação ao cimento Portland comum ou misto (Pérez-Cortes e Escalante-García, 2020).

Por outro lado, aditivos especiais são produtos químicos adicionados ao concreto durante a mistura; Alguns exemplos são (Taylor, 1997): i) aditivos redutores de água, que minimizam esta quantidade sem comprometer a trabalhabilidade das misturas, facilitando sua colocação e compactação (Muñoz-Zapata et al., 2022); ii) aditivos aceleradores de pega e endurecimento, que são utilizados em condições de baixas temperaturas ou projetos que exigem comissionamento rápido (Roychand et al., 2021); iii) aditivos retardadores de pega, úteis em climas quentes, em projetos que exigem tempo de mistura prolongado devido ao transporte de concreto fresco em longas distâncias ou devido a condições especiais de colocação (Tari et al., 2022); iv) aditivos expansivos, para controlar a retração do concreto durante a presa e reduzir fissuras (Zhang et al., 2023); v) aditivos impermeáveis, que reduzem a passagem de água e evitam vazamentos (Akchurin et al., 2016).

Por fim, a pré-fabricação é uma técnica de construção de elementos estruturais (paredes, vigas, pilares, lajes etc.) em ambiente controlado para depois transportá-los até o canteiro de obras e montá-los (Kosmatka et al., 2004). Permite um maior controle de qualidade através de sistemas de monitorização e testes laboratoriais, reduzindo os tempos de construção e facilitando a instalação, minimiza também o desperdício de materiais em obra e melhora a eficiência na utilização dos recursos, uma vez que tanto o design como é realizado o fabrico dos elementos em de acordo com os requisitos do projeto (Minunno et al., 2018).

3.3. Projetos eficientes

O projeto eficiente de estruturas de concreto contribui para minimizar o uso de recursos e impactos ambientais, além de maximizar o desempenho dos elementos por meio de algumas técnicas de projeto como otimização estrutural (Yang et al., 2022), análise do ciclo de vida (Mostert et al., 2021) e energia (Wang et al., 2022).

A otimização estrutural ou projeto estrutural eficiente envolve encontrar a geometria e dosagem de materiais ideais para uma estrutura de concreto, o que minimiza as quantidades de concreto e aço, reduzindo a pegada ambiental através da otimização dos recursos naturais. Isto é conseguido através de modelagem matemática baseada nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais, mas levando em consideração fatores de segurança, relações custo-benefício e possíveis problemas patológicos que possam afetar a estrutura (Marsh et al., 2022; Yang et al., 2022). A fabricação de concreto de alto desempenho e durabilidade pode envolver o uso de materiais avançados, bem como sistemas construtivos leves ou de alta eficiência (lajes aligeiradas, contraventamento adequado ou otimização de juntas e soldagem) (Adesina, 2021).

A análise do ciclo de vida (ACV) permite determinar o impacto ambiental de uma estrutura de concreto associado à sua vida útil (Wang et al., 2022), ao identificar os maiores problemas ambientais e permitir a gestão das estratégias necessárias para minimizá-los durante as diferentes etapas do projeto. Alguns exemplos são a energia incorporada em componentes de cimento e concreto, durante a fabricação e transporte, bem como a potencial reciclagem de resíduos (Mostert et al., 2021; Wang et al., 2022). A ACV permite tomar decisões informadas desde a concepção da estrutura, selecionando materiais e sistemas construtivos com menor impacto ambiental com base

na procura de energia, emissões e utilização de recursos. Dentre as pesquisas de ACV, destaca-se o trabalho de C. Mostert et al. (2021) que avalia a pegada climática e de recursos do concreto reciclado. A Figura 4 apresenta o modelo de ACV que abrange todas as etapas da vida útil do concreto: obtenção da matéria-prima, transporte, produção do concreto, sua demolição e reciclagem como agregado para concreto novo com/sem aplicação estrutural.

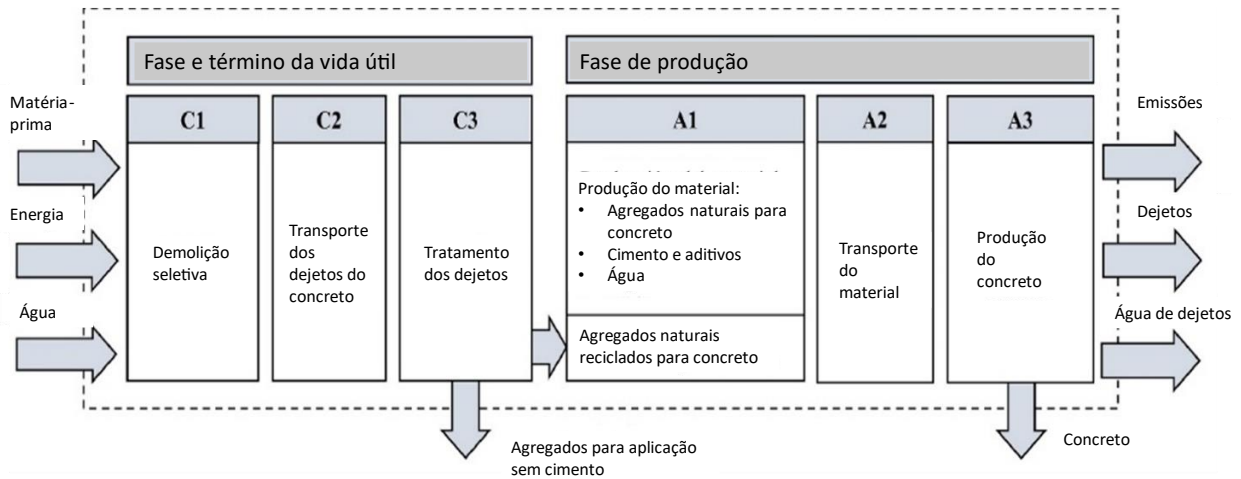


Figura 4. Modelo para análise do ciclo de vida do concreto reciclado (Mostert et al., 2021).

Por outro lado, a análise de energia é uma ferramenta de projeto eficiente que se baseia nos princípios da termodinâmica para avaliar a quantidade de energia que foi investida diretamente em um material durante sua vida útil (como a eletricidade consumida durante a produção, transporte) e indiretamente (como energia solar, fóssil e outras, necessárias à extração, processamento e fabricação), ou seja, em relação aos recursos naturais utilizados para produzir um material (Amaral et al., 2016). Conseqüentemente, permite avaliar a eficiência energética de um sistema, identificando estagnações energéticas e determinando as fontes de energia mais significativas em termos da sua contribuição para o sistema. No caso das estruturas de concreto, as alternativas podem ser avaliadas em termos de demanda energética e podem ser selecionadas as opções de menor consumo, o que inclui a escolha de materiais com menor teor energético, a otimização do processo de produção e transporte, bem como as estratégias de projeto, construção e manutenção que minimizem o consumo de energia durante o ciclo de vida do elemento (Wang et al., 2022).

3.4. Uso responsável de agregados reciclados

A reutilização de agregados provenientes da britagem de concreto [8] ou de outros resíduos (Marsh et al., 2022; Nodehi et al., 2022) pode reduzir a demanda por matérias-primas primárias e a geração de resíduos, o que permite fechar o ciclo de vida de concreto e outros materiais simultaneamente, a fim de promover uma gestão mais eficiente dos recursos. Alguns exemplos são resíduos de: tijolo (Fořt et al., 2020), vitrocerâmica (Rada et al., 2023) e pedras de pavimentação (Neves et al., 2022), bloco cerâmico (Barreto et al., 2021) ou concreto (Fořt et al., 2020), asfalto (Delwar et al., 1997; Linek et al., 2023), polímeros como PVC (Taghvaei et al., 2022), PET (Al-Sinan et al., 2022) e borracha de pneus (Díaz-Aguilera et al., 2021), produtos agroindustriais como cinza de casca de arroz (Althoey et al., 2022) e bagaço de cana-de-açúcar (Ariza-Figueroa et al., 2022), vidro pulverizado (Nodehi et al., 2022), entre outros. Esses materiais reciclados são processados e utilizados como substitutos dos agregados convencionais (brita e areia) na mistura do concreto.

Alguns benefícios de usá-los são:

- i) A minimização da demanda por matérias-primas naturais que reduz a extração e processamento de recursos como areia e cascalho dos rios (Nodehi et al., 2022).

- ii) Gestão eficiente de resíduos, ou seja, o aproveitamento produtivo de materiais que de outra forma seriam considerados resíduos e acabariam em aterros sanitários, conferindo-lhes uma segunda vida útil quando utilizados como agregados em novas estruturas de concreto (Marsh et al., 2022).
- iii) A diminuição da demanda energética, uma vez que a produção de agregados reciclados requer menos energia em comparação com a extração e processamento de materiais naturais (Ariza-Figueroa et al., 2022).

Vale ressaltar que a utilização de agregados reciclados requer um processo adequado de seleção, classificação e processamento para garantir sua qualidade, atendendo aos requisitos de resistência, durabilidade e outras propriedades de interesse do concreto (Al-Sinan et al., 2022; Althoey et al., 2022; Díaz-Aguilera et al., 2021). Um exemplo de implementação de agregados de vidro reciclado foi publicado por M. Nodehi et al. (2022). A Figura 5 é um modelo triangular que relaciona os benefícios ambientais com os benefícios econômicos e a recuperação de recursos com base no conceito dos 6Rs: refabricação, redesenho, reciclagem, reutilização, recuperação e redução de resíduos.

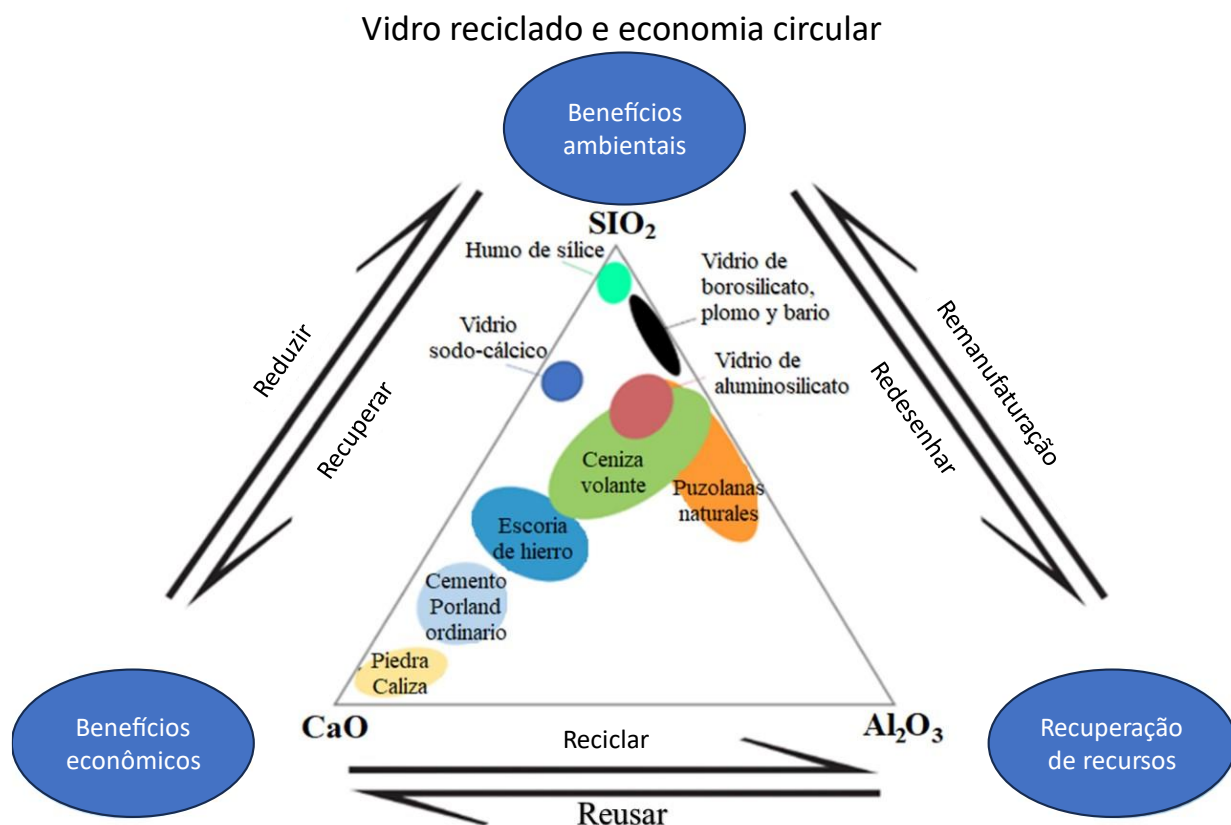


Figura 5. Modelo de economia circular para agregados de resíduos de vidro

3.5. Extensão do ciclo de vida das estruturas de concreto

Ao promover a manutenção, reabilitação e renovação de estruturas de concreto, a projeção do ciclo de vida pode ser ampliada e a necessidade de construção de novas obras pode ser reduzida (Breugel, 2017). Isto envolve a adoção de procedimentos de projeto que buscam aumentar a durabilidade dos materiais, bem como a implementação de técnicas de reparo, renovação e reforço estrutural. Portanto, extensão do ciclo de vida refere-se a prolongar a vida operacional das estruturas de concreto em vez de optar por demoli-las e reconstruí-las (Anastasiades et al., 2020; Bourke et al., 2019).

Para alcançar um ciclo de vida mais longo do concreto, as seguintes abordagens podem ser aplicadas:

- i) O projeto para durabilidade consiste em propor novas estruturas de concreto considerando critérios que promovam a minimização dos fenômenos de deterioração e maximizem a longevidade dos elementos. Isto envolve a utilização de materiais de alta qualidade, técnicas construtivas adequadas acompanhadas de supervisão rigorosa, sistemas de proteção contra corrosão, bem como a consideração das cargas e condições ambientais às quais o elemento de concreto estará exposto durante seu ciclo de vida (Breugel, 2017); portanto, este tipo de projeto reduz a probabilidade de danos e degradação prematura.
- ii) A manutenção preventiva regular e adequada é essencial para garantir a durabilidade e o bom estado das estruturas de concreto ao longo do tempo. O monitoramento e a inspeção constantes permitem que quaisquer sinais de deterioração, desgaste ou danos sejam identificados e tratados em tempo hábil (Anastasiades et al., 2020; Ariza-Figueroa et al., 2022). Isto pode incluir atividades de limpeza, vedação de fissuras, substituição de itens deteriorados, manutenção de sistemas de drenagem e controle de corrosão; o que ajuda a prevenir grandes problemas a tempo.
- iii) A reparação e reforço estrutural são aplicados em estruturas de concreto com danos ou deterioração significativos, em vez de demolição e reconstrução. Essas técnicas corrigem problemas identificados e restauram a integridade estrutural por meio de reparos como restauração de resistência, impermeabilização, substituição de elementos danificados e reparo de fissuras (Bourke et al., 2019). O reforço estrutural envolve a adição de elementos ou sistemas que fortalecem a estrutura e melhoram a sua capacidade de carga. Tudo isto ajuda a prolongar a vida útil de forma eficaz e econômica.

Porém, para consolidar essas abordagens, são necessários modelos esquemáticos de vida útil que orientem o estágio da estrutura de concreto e as ações que podem ser tomadas para prolongar sua durabilidade. Nesse sentido, um exemplo é apresentado na Figura 6 (Castro e Helene, 2007), em que a vida útil é dividida em 7 etapas. Este modelo apresenta-se sob uma filosofia abrangente, que divide o ciclo de vida em etapas que estão de acordo com o planejamento do projeto, bem como a aplicação da economia circular de acordo com as necessidades específicas de cada etapa. Por exemplo, para obter um desempenho ideal, são analisadas as três primeiras etapas que incluem o planejamento, a preparação e o dia do comissionamento da vida útil. A condição mínima de serviço é mantida apenas durante a quarta etapa, onde é necessária a manutenção preventiva contra a entrada de substâncias agressivas (abordagem ii para prolongar o ciclo de vida). Em geral, os estágios cinco, seis e sete são onde a estrutura não apresenta mais desempenho aceitável. Esses estados incluem vida útil residual, vida residual e fim da vida residual, nos quais seria analisada a abordagem iii de reparo estrutural e reforço descrita acima. Consequentemente, prolongar o ciclo de vida do concreto implica poupar recursos, energia e emissões associadas às novas construções. Além disso, minimiza os resíduos resultantes da demolição e reduz a dependência relacionada com recursos não renováveis, mantendo e aproveitando ao máximo as estruturas existentes (Anastasiades et al., 2020).

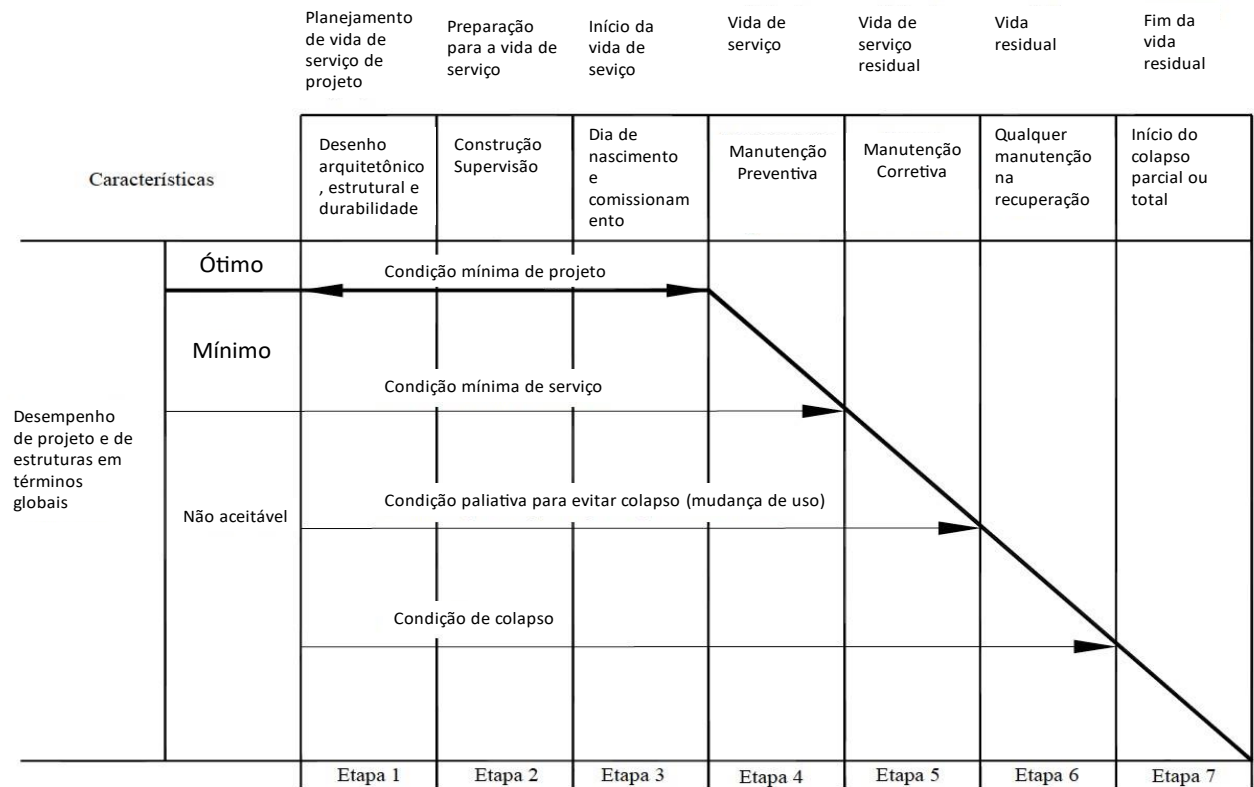


Figura 6. Modelo esquemático de vida útil em 7 estágios (Castro e Helene, 2007).

3.6. Identificação e uso de recursos locais

A utilização de recursos locais na fabricação de cimento e concreto implica a utilização de fontes de matéria-prima próximas às plantas de produção, reduzindo as distâncias de transporte e, portanto, o impacto ambiental (Caldas et al., 2021; Mostert et al., 2021). Também minimiza a necessidade de importação de matérias-primas, os custos de produção e transporte, bem como a desvantagem devido à variação dos preços dos materiais externos à região (Iacovidou et al., 2017), tornando o ICC mais resiliente e sustentável. termos económicos.

Ao mesmo tempo, promove o progresso socioeconómico nas áreas de extração de materiais; isto se deve à criação de empregos locais, o que fortalece as cadeias produtivas da região (Geisendorf et al., 2018). É importante mencionar que esta estratégia deve ser executada de forma responsável e sustentável, levando em consideração aspectos socioambientais (Corvellec et al., 2022; Maury-Ramírez et al., 2022), ou seja, estabelecendo extração adequada e práticas de gestão dos recursos naturais que garantam a proteção dos ecossistemas e o respeito pelas comunidades locais.

Alguns exemplos são o uso de escórias metalúrgicas (Phiri et al., 2021), cinzas volantes (Ghosh et al., 2020) de usinas termelétricas, pozolanas naturais como areias vulcânicas (Contrafatto, 2017), fumaça de sílica (Al-Hamran et al., 2021), pedras-pomes (Ulusu et al., 2023) ou cinza de casca de arroz (Althoey et al., 2022), produtos de demolição de concreto (Lederer et al., 2020), areia e cascalho de pedreiras locais, entre outros. Esses materiais servirão como substitutos do cimento ou agregados, melhorando as propriedades das misturas cimentícias através de sua reatividade pozolânica e outros processos (Kosmatka et al., 2004); porém, é sempre importante avaliar a qualidade desses recursos para garantir sua adequação.

3.7. Processo otimizado

A melhoria de processos pode focar nos processos de fabricação de cimento ou de construção em concreto (Fay et al., 2014; Guimarães et al., 2021; Pérez et al., 2009). Por exemplo, a CE envolve

a adoção de tecnologias mais limpas, como a captura de carbono (Kaliyavaradhan et al., 2020) e armazenamento (Hanif et al., 2023), o uso de combustíveis alternativos de baixas emissões (Chatterjee et al., 2019; Villagrán-Zaccardi et al., 2022), bem como a implementação de práticas de otimização energética, como cogeração de calor e energia, captura de calor residual e uso de energia renovável (Mathews et al., 2011; Sharifikolouei et al., 2021).

Por outro lado, a otimização dos processos construtivos pode ser realizada através do uso eficiente de materiais de construção (Geisendorf et al., 2018), do uso adequado de máquinas e equipamentos (Marsh et al., 2022), bem como de tais como planejamento logístico eficiente (Sehnen et al., 2019). Portanto, a melhoria destes processos consiste na implementação de práticas e técnicas que otimizem os sistemas utilizados (Hentges et al., 2021), mas que simultaneamente reduzam significativamente o consumo de recursos e a deterioração ambiental associada.

Uma área fundamental para melhorar a eficiência é a gestão de recursos materiais, como resíduos de construção e demolição com concreto (Hentges et al., 2021; Lederer et al., 2020). Em vez de considerar os resíduos como resíduos, podem ser implementadas estratégias de gestão que promovam a reutilização, a reciclagem e a valorização dos materiais, o que passa pela sua separação durante a demolição, pelo estabelecimento de sistemas de recolha e triagem de resíduos nos estaleiros de construção, de forma a utilizar esses materiais em novos projetos (Lederer e outros, 2020). Outra forma de melhorar a gestão de recursos é uma maior formação em tecnologia do concreto e química do cimento, com o objectivo de otimizar o manuseamento e supervisão destes materiais em obra (Kosmatka et al., 2004; Taylor, 1997).

Além disso, o uso adequado de máquinas e equipamentos na construção pode contribuir para maior eficiência e redução no consumo de recursos (Hentges et al., 2021; Karlsson et al., 2020; Villagrán-Zaccardi et al., 2022). A seleção de máquinas eficientes, com tecnologias de baixo consumo de energia e emissões reduzidas, pode otimizar o desempenho e minimizar os impactos ambientais (Karlsson et al., 2020). Da mesma forma, a implementação de práticas adequadas de manutenção e treinamento garante o uso adequado dos equipamentos e prolonga seu ciclo de vida, evitando a necessidade de trocas frequentes.

A logística eficiente relacionada aos processos de construção é outro aspecto importante; por exemplo, isto envolve a otimização de rotas de transporte, distância percorrida, carga de veículos, emissões e consumo de combustível (Karlsson et al., 2020; NoParast et al., 2021); isto também aumentaria a vida útil das estradas. Por outro lado, a programação e coordenação adequadas das atividades de construção podem evitar atrasos desnecessários, reduzir o tempo de execução da obra e otimizar a utilização dos recursos.

A melhoria dos processos construtivos também pode passar pela utilização de sistemas modulares e pré-fabricados, pois isso reduz a necessidade de obras no local, economizando tempo e recursos (Minunno et al., 2018). Outra estratégia pode ser a padronização baseada no uso de materiais, construção e processos de fabricação na indústria da construção (Villagrán-Zaccardi et al., 2022).

4. APLICABILIDADE DA ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA LATINO-AMERICANA DE CIMENTO E CONCRETO

O EC oferece uma grande oportunidade para alcançar a sustentabilidade das ICC na América Latina. No entanto, é importante ter em conta as condições da região para aplicar eficazmente estes princípios circulares. Alguns fatores são o quadro regulamentar, a infraestrutura de reciclagem, a disponibilidade e qualidade dos materiais reciclados, as condições socioeconómicas e culturais, bem como a cooperação regional (Maury-Ramírez et al., 2022).

Primeiro, a implementação bem-sucedida da EC nas ICC na América Latina requer um quadro regulamentar sólido (United Nações, 2023; Villagrán-Zaccardi et al., 2022). Isto significa conhecer ou desenvolver políticas e regulamentos que promovam a adoção de práticas circulares para a

reutilização de resíduos, a adoção de projeto eficiente em infraestruturas, a gestão adequada dos produtos de demolição etc.

Então, é necessária infraestrutura de reciclagem e gestão de resíduos para realizar a separação e classificação nos canteiros de obras (Colangelo et al., 2020; NoParast et al., 2021). O investimento em infraestrutura e a formação de profissionais em gestão de resíduos são essenciais para alcançar uma EC eficaz na região.

Por outro lado, a utilização de materiais reciclados requer controle de disponibilidade e qualidade (Muñoz-Zapata et al., 2022; Wang et al., 2022). Assim, é importante promover a investigação e a inovação tecnológica para a produção de agregados reciclados de elevada qualidade, bem como o estabelecimento de normas e certificações que garantam que estes materiais são adequados para utilização na construção, promovendo assim a confiança e a aceitação de esses recursos na indústria.

Além disso, devem ser considerados fatores socioeconômicos como a disponibilidade de fontes de investimento para tecnologias circulares, educação e conscientização sobre a importância da sustentabilidade (GCCA, 2023; United Nações, 2023). Vale ressaltar que, num cenário ideal para o EC, haveria a colaboração ativa da comunidade local durante o desenvolvimento dos projetos.

Da mesma forma, a cooperação entre os países latino-americanos é necessária para consolidar conhecimentos, experiências e práticas adequadas; isto pode impulsionar a adoção de soluções circulares e otimizar os esforços e os recursos disponíveis (GCCA, 2023; Maury-Ramírez et al., 2022; Villagrán-Zaccardi et al., 2022). A criação de redes de colaboração regional e a promoção de projetos conjuntos podem acelerar a transição para uma indústria mais sustentável na América Latina.

5. CONCLUSÕES

Para cumprir os objetivos internacionais sustentáveis, a indústria do cimento e do concreto na América Latina requer uma abordagem sistematizada da economia circular para orientar os esforços na educação, investigação, desenvolvimento tecnológico, infraestruturas, quadro regulamentar, normalização, investimento e cooperação regional. Alternativas a nível global têm demonstrado a adequação desta abordagem, uma vez que os vários modelos resultam em práticas sustentáveis que acrescentam valor aos materiais de cimento e concreto através da minimização de gases de efeito estufa, conservação de recursos e minimização de resíduos; mas também torna a indústria e as regiões que a implementam mais resilientes e economicamente sustentáveis. Contudo, é necessária a adoção e desenvolvimento de tecnologias avançadas, bem como uma abordagem de projeto e construção baseada em critérios de otimização e durabilidade, além de uma maior capacitação dos atores envolvidos na indústria e na sociedade em geral. Portanto, espera-se que este trabalho contribua para a integração entre a economia circular e a indústria de cimento e concreto através da disseminação desta visão.

6. AGRADECIMENTOS

JH Díaz-Aguilera agradece à CONAHCYT pela bolsa concedida com CVU 929098.

7. REFERÊNCIAS

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., Sehwat, 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*. Maters. 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*. Maters. 13(10):2412. <https://doi.org/10.3390/ma13102412>
- Atta, I., Bakhom, 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*. Maters. 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/jieec.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. Mater. 232:117232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>
- Linek, M., Bacharz, M., Piotrowska, P. (2023), *Surface Cement Concrete with Reclaimed Asphalt*. Mater. 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-Fontboa, B., Martínez-Abella, F. (2009), *“EC Techniques in the Structural Concrete Field”*, IGI Global.
- Pérez-Cortes, 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.jobbe.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: Baines, 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.
- Ulusu, 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*. *Constr. Build. Mater.* 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*. *Mater.* 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>