

Los Residuos De Construcción Y Demolición: ¿Un Problema O Una Oportunidad?

Construction and demolition waste: a problem or an opportunity?

Autores

Autores: Rainer Sarmiento Matos¹, René A. Puig Martínez², Ileana Pereda Reyes³, Anay de los Ángeles Rodríguez Matos⁴

¹ Ingeniero Civil, Observatorio Social, VREU, Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría (CUJAE), Calle 114 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba, rainersarmat@civil.cujae.edu.cu

² Ingeniero Civil, Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría (CUJAE), Calle 114 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba, rupig@civil.cujae.edu.cu / <https://orcid.org/0000-0001-9025-4423>

³ Ingeniera Química, Empresa de Ingeniería del Reciclaje (ISDE), Zapata e/ 2 y Paseo, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba, ileana@isde.co.cu, ileana@mecanica.cujae.edu.cu

⁴ Licenciada en Biología, Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría (CUJAE), Calle 114 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba, anay@icb.cujae.edu.cu, / <https://orcid.org/0000-0003-3399-7305>

RESUMEN

La generación de residuos de construcción y demolición (RCD) producto de la actividad antropogénica y los patrones tanto tecnológicos como de consumo, es una problemática aún por resolver en todos los países. A pesar de ser un problema presente en cada país, las estadísticas oficiales solapan a los RCD en categorías diversas, lo que dificulta el análisis con mayor profundidad. En el presente trabajo se realiza un compendio sobre la generación, caracterización y usos de los RCD, así como de la influencia del empleo de áridos reciclados (AR) en las propiedades de morteros y hormigones, según publicaciones en revistas de impacto de últimos cinco años. La bibliografía consultada confirma la factibilidad del uso de los RCD como AR para la conformación de nuevos materiales de la construcción, en particular morteros y hormigones, con sus ventajas y desventajas. Como resultado del trabajo, se puede resaltar que para mantener el valor de cada materia prima utilizada y recuperar estos recursos desde los RCD, con criterios circulares y medio ambientales, la legislación de cada país es una de las mayores fuerzas motrices, siendo el rasgo distintivo en la gestión de estos residuos a nivel mundial. Por último, se hace una breve evaluación de la influencia del empleo de AR en Cuba en las propiedades de morteros y hormigones según las publicaciones de impacto referenciadas.

Palabras claves: economía circular, impacto ambiental, residuos de construcción y demolición, residuos sólidos, sostenibilidad.

ABSTRACT

The generation of construction and demolition wastes (RCD) as a result of anthropogenic activity and both technological and consumption patterns is a problem that has yet to be resolved in all countries. Despite being a problem present in each country, the official statistics overlap the RCDs in different categories, which makes it difficult to analyze them in greater depth. In the present work, a compendium is made on the generation, characterization and uses of RCD, as well as the influence of the use of recycled aggregates (RA) on the properties of mortars and concretes, according to publications in impact journals of the last five years. The consulted bibliography confirms the feasibility of using RCDs as RA for the conformation of new construction materials, particularly mortars and concretes, with their advantages and disadvantages. As a result of the work, it can be highlighted that in order to maintain the value of each raw material used and recover these resources from the RCD, with circular and environmental criteria, the legislation of each country is one of the main driving forces, being the distinctive feature in the management of this waste worldwide. Finally, a brief evaluation of the influence of the use of AR in Cuba on the properties of mortars and concretes is made according to the referenced impact publications.

Keyword: circular economy, construction and demolition waste, environmental impact, solid waste, sustainability

Nota Editorial: Recibido: Julio 2023 Aceptado: Septiembre 2023

1. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población y la economía tanto en los países desarrollados como en desarrollo, implica una demanda de infraestructura que, unida al aumento extensivo en la tasa de construcción, contribuye al agotamiento de recursos naturales [1]. Las proyecciones muestran que el mundo tendrá 1500 millones de nuevos residentes urbanos en 2035 y se estima que para mediados del año 2080 se puede alcanzar la cifra de 10400 millones. De ellos casi el 90% será aportado por países de Asia y África, generando desafíos únicos de viviendas e infraestructuras. Por ejemplo, después de China, África tiene el mayor crecimiento en superficie construida, y prevé, hasta 2030, gastos de 4,8 billones de USD en esta esfera. En la India se prevén 170 millones de nuevas casas construidas para 2030, colocándose después de África [2]. En adición, los patrones tecnológicos y de consumo exigen una renovación masiva de las edificaciones antiguas que generan residuos de construcción y demolición (RCD) siendo una de las problemáticas ambientales que continúa impactando actualmente en todos los países [3].

La industria de la construcción enfrenta, por tanto, el problema tanto de la disminución de los recursos naturales para la generación de sus productos, en particular los áridos, como el del aumento de los desechos de construcción y demolición. Por una parte, de la extracción de minerales no metálicos a nivel mundial, aproximadamente el 40,8% corresponde a grava y el 31,1% a arena. Por otra parte, se generan volúmenes crecientes de RCD en forma de edificaciones demolidas, bases de carreteras de hormigón, piezas de hormigón prefabricadas rechazadas y el hormigón no utilizado en plantas mezcladoras de hormigón, mostrando una industria altamente dependiente de soluciones que se dirijan a la sostenibilidad de la misma. La transición hacia una economía más circular donde los flujos de producción podrían reintegrarse para extender la cadena de valor de cada materia utilizada en los procesos, es una solución prometedora [4]. En contraste, las cifras actuales estiman que la economía mundial es solo un 6% circular [3, 5].

A pesar de esta panorámica, los RCD pueden dejar de ser un residuo y constituirse en un recurso, facilitado por planes de manejo que permitan incluso, la certificación de las nuevas construcciones [6]. Dentro de las características, muy heterogéneas, que potencian a los RCD como flujo de nuevos materiales está el alto porcentaje de hormigón que por lo general poseen, por lo que su reutilización como fuente de áridos ha surgido como una alternativa atractiva a los áridos naturales en la fabricación de hormigones y morteros [7-9]. Las propiedades mecánicas del nuevo hormigón obtenido ha sido un tema de mucho interés, desarrollándose alternativas para elevar las mismas con el empleo de otros materiales adicionales [12]. También se pueden utilizar como mejorador de suelos cuando se realiza un proceso de activación del álcali al RCD [13, 14] o transformándose para eliminar metales pesados presentes en aguas residuales industriales [15].

Ante estas opciones, cabe preguntar si los RCD son un problema o una oportunidad. Por una parte, analizar si son un problema, dado por las enormes cifras que muchas veces de manera descontrolada van a parar a los basureros, contaminando el medio ambiente y con una deficiente gestión de su reciclaje; o por el contrario, si son una oportunidad que se abre para su aprovechamiento como fuente de materia prima en la fabricación de productos de la construcción, siempre que sean bien gestionados y se efectúe un eficiente control de la calidad en su utilización. Es por ello que el presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión crítica sobre la generación y gestión de los RCD, a tono con los resultados de investigaciones publicadas en revistas de impacto en los últimos cinco años, así como de las tendencias actuales para la implementación de criterios de economía circular y la sostenibilidad de la industria de la construcción. De igual forma se realiza un acercamiento a la situación actual de esta temática en Cuba de acuerdo con los resultados recogidas en estas publicaciones.

2. DESARROLLO

2.1. Metodología Empleada Para El Compendio

Para cumplir con el objetivo del trabajo, se realizó una búsqueda exhaustiva de la temática de interés. Las principales bases de datos empleadas en la búsqueda fueron Scopus, MDPI y web de la ciencia (WoS), seleccionando previamente de estas fuentes un total de 119 artículos. Para la búsqueda de la muestra se seleccionaron palabras claves que se manejan en el campo de acción de la investigación, en particular, RCD, gestión de RCD, impacto ambiental de RCD, sostenibilidad y economía circular, áridos reciclados (AR), tanto en inglés como en español. El siguiente paso consistió en el análisis de los resúmenes o lectura completa de los artículos más relevantes, lo que permitió la selección del contenido de 79 artículos. Los resultados de la búsqueda condujeron a la identificación de los factores más relevantes que inciden en el aporte de la gestión y procesamiento de los RCD. Un resumen del procedimiento seguido se muestra en la figura 1.

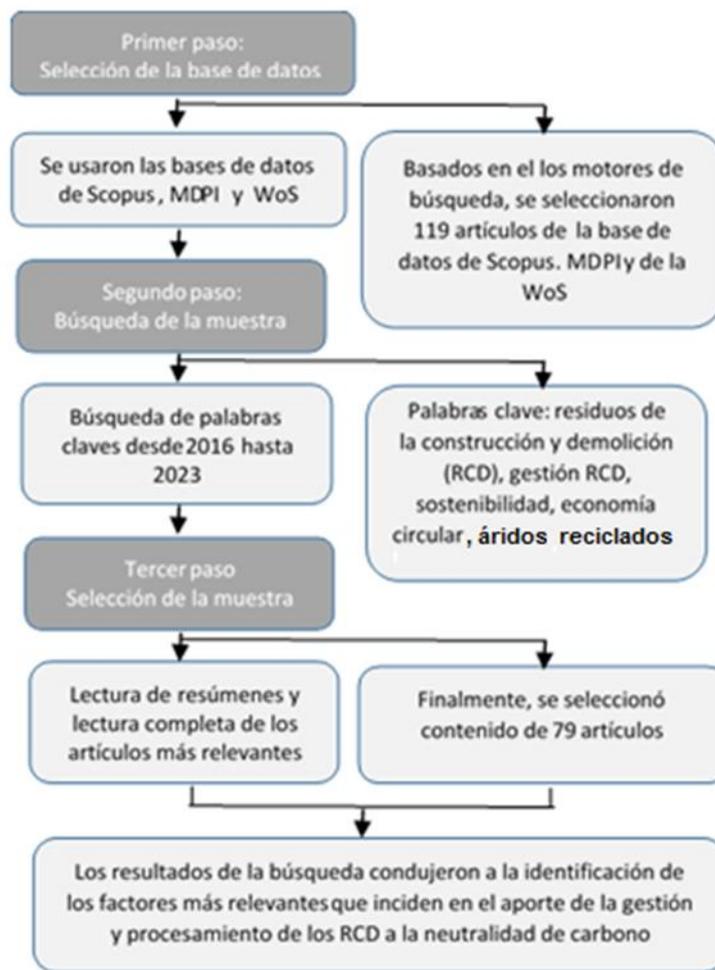


Figura 1: Metodología empleada para la revisión de la literatura

2.2. Generación Y Composición De Los Residuos De Construcción Y Demolición

Existen varias definiciones de RCD. Por ejemplo, en la Unión Europea (UE), se definen como "los materiales y elementos que resultan de la construcción, renovación y demolición de edificios y estructuras" [16]. La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los EE.UU. define a los RCD como "residuos generados a partir de la construcción, renovación, reparación y demolición de estructuras tales como edificios residenciales y comerciales, carreteras y puentes" [17, 18]. Los RCD, al generarse por diversas fuentes y actividades, tienen una composición muy heterogénea. De esta composición depende el uso posterior que puede tener en el proceso de transformación para la recuperación de recursos.

Los RCD contienen de forma general los siguientes materiales: hormigón, madera (de edificios), asfalto (de carreteras y tejas), yeso (principal componente de los paneles de yeso), metales (principalmente acero), ladrillos, vidrio, plásticos, componentes de construcción recuperados (puertas, ventanas y accesorios de fontanería) y árboles, tocones, tierra y rocas procedentes de los desmontes. De ellos, el hormigón, el acero y el asfalto son los de mayor tasa de recuperación [19, 20].

La estimación de la generación de estos residuos es muy imprecisa. De forma general se reflejan como categoría independiente y no forma parte de los reportes oficiales de los residuos sólidos urbanos, por lo que solo el acercamiento a los estudios de casos, permite tener una idea de la generación de los RCD. A pesar de esto, también se refieren relaciones porcentuales de los RCD una vez que llegan a los vertederos, considerándose que representan entre 10% y el 30% del total de residuos vertidos, llegando al 50% en países de la UE [4, 19]. Si para el año 2050 se prevé que en el mundo se generen 3400 millones de toneladas de basura [21], cabe esperar que, de no realizarse un esfuerzo por gestionar mejor los RCD, en los vertederos habrían de 340 a 1020 millones de toneladas de este material.

De análisis de las estadísticas internacionales, tanto de las Naciones Unidas (ONU) [22] como de la UE [23], así como de otras fuentes [20, 24-26] se pudo comprobar que en el mundo se generan aproximadamente 4667 millones de toneladas de RCD anualmente. Del total generado en el mundo, el 95,6% se concentra en China, los estados de la UE, EE.UU. y la India, con el 56,04%, 20,85%, 13,45% y 9,66% del total de ese grupo, respectivamente, tal como se puede observar en la figura 2 a.

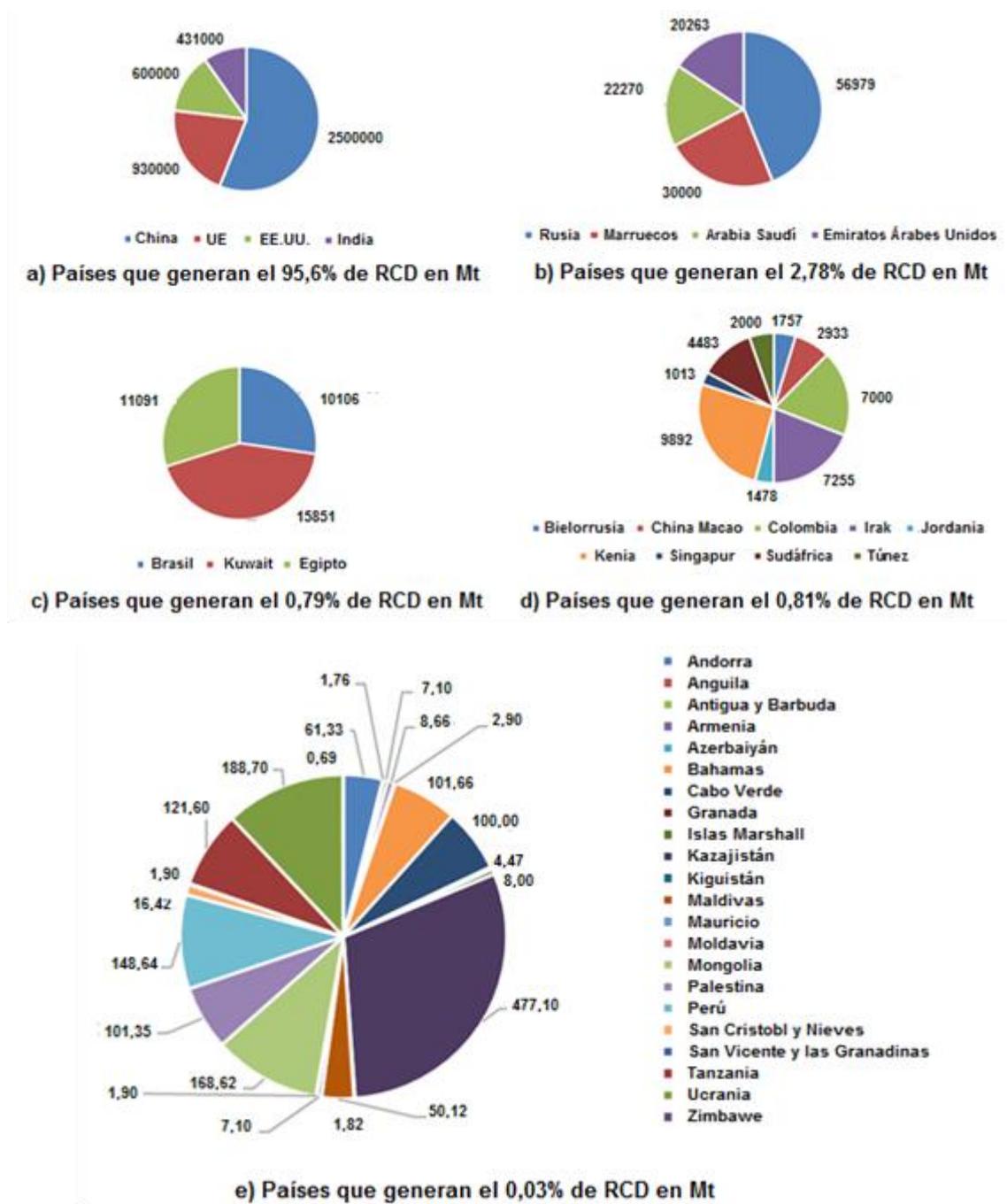


Figura 2: Generación de residuos de construcción y demolición por países, de acuerdo a datos oficiales
 • Generan el 95,6%; b) Generan el 2,78%; Generan el 0,79%; Generan el 0,81%; Generan el 0,03% [20, 22-26]

Por otra parte, se perciben tres grupos que generan residuos en el orden de 1000 hasta 60000 Mt que aportan casi el 5% de los RCD generados en el mundo (ver figuras 2 b, c y d), siendo Rusia y Marruecos los de mayor aporte. Resalta un quinto grupo de países que lo que reportan es inferior a las 1000 Mt de RCD generados en el año (Figura 2 e), siendo Kazajistán, Ucrania, Mongolia, Perú, Tanzania, Bahamas, Palestina y Cabo Verde, los países de mayor contribución en este grupo.

Ahora bien, China es el país de mayor generación de RCD en el mundo [1], pero también es el país que mayor población. Como los números absolutos suelen distorsionar un poco la realidad, varios autores efectúan análisis en términos de índices de generación de RCD per cápita. Tomando datos de la población correspondientes al año en el que se reporta la generación de RCD por países [27], el análisis se torna interesante. En la figura 3 se muestran los países que mayor cantidad de RCD generan por habitantes en 2022.

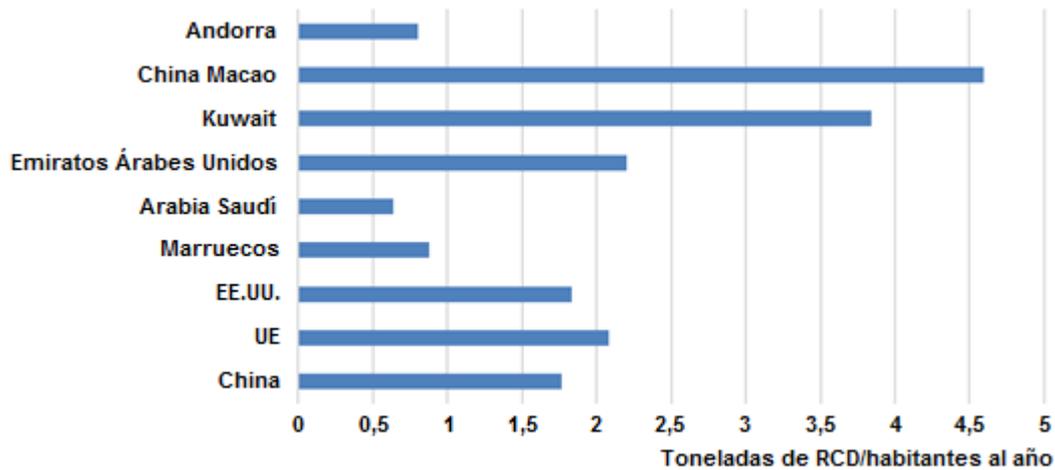


Figura 3: Índice anual de generación de residuos de construcción y demolición por habitantes

Resulta sorprendente que el orden de relevancia cambia. Macao y Kuwait aparecen como los países de mayor índice de generación de RCD por habitante al año, siendo responsables de más del 40% de aporte en este grupo. Le siguen los Emiratos Árabes Unidos, la UE y los EE.UU. China entonces pasa a un sexto lugar en el impacto por la generación de residuos de construcción y demolición, siguiéndole Marruecos, Andorra y Arabia Saudí.

Del resumen estadístico, se acota lo siguiente:

- No fue posible acceder a información de muchos países, incluyendo a Cuba, dentro de la categoría que corresponde a los RCD.
- Se considera que en los países donde persisten conflictos armados o están afectados con regularidad por eventos climáticos de fuerte impacto o tienen baja ejecución de programas de reparación y mantenimientos constructivos, las estadísticas no reflejan totalmente la realidad en cuanto a la generación de RCD.
- Ocho de los países que conforman el análisis realizado, reportan valores en generación de RCD que datan de casi 20 años atrás, aunque no son los de mayor peso en los resultados (Egipto, Jordania, Túnez, Bahamas, Cabo Verde, Islas Marshall, Palestina y San Vicente y Las Granadinas), pero en varios de ellos la realidad puede ser bastante diferente.

Si se compara el valor total de generación de RCD según la figura 2, y a pesar de las acotaciones anteriores, la tasa definida de reciclaje o reuso de los RCD es superior al 70%. Este porcentaje no está lejos de la realidad por cuanto los mayores esfuerzos están en los países que también generan mayores cantidades de RCD. Sin embargo, esto puede solapar la enorme problemática ambiental que persiste en la no adecuada gestión de los RCD, sobre todo en países de menor desarrollo. La circularidad de las soluciones aún dista de la meta deseada y en aquellos países donde la cantidad que se genera es menor, la tasa de reciclaje o reuso no sobrepasa el 20% y se ha podido constatar que la legislación aún carece del efecto necesario para regular esta pérdida de recursos [4, 20, 28].

Para lograr la circularidad de los procesos donde se generan los RCD es necesario un acercamiento a las características de estos residuos. Como se conoce, las actividades que lo generan son diferentes y por ello es diferente la composición [29-31]. De esta forma se pueden identificar tres grandes áreas de trabajo: nuevas construcciones (lo que implica la extracción directa de minerales no metálicos), renovación y demolición [28]. En locaciones sensibles a conflictos de guerra, efectos climáticos o de bajo mantenimiento constructivo, también se incorporan los derrumbes [32]. Por otro lado, y estrechamente ligado a la forma de gestionar los procesos y los RCD resultantes, se suelen dividir en dos grandes grupos: RCD aprovechables y RCD no aprovechables. Estos últimos vinculados a un origen con contaminación con residuos peligrosos o que de ninguna forma se acepta para su uso posterior por no reunir los requisitos técnicos para ello [15, 33]. En la figura 4 se grafican los componentes de los RCD aprovechables.

A pesar de la heterogeneidad, se puede establecer como regla que todos los RCD son mixtos y que aquellos RCD que provienen de actividades de desmantelamiento o renovaciones capitales, tienen más componentes metálicos que los que son de obras constructivas nuevas [6]. Por la revisión hasta el momento y los criterios de los expertos, siempre se incurre en el solapamiento de categorías, por lo que, desde la definición, hasta la composición, es difícil acotar a los RCD [29].

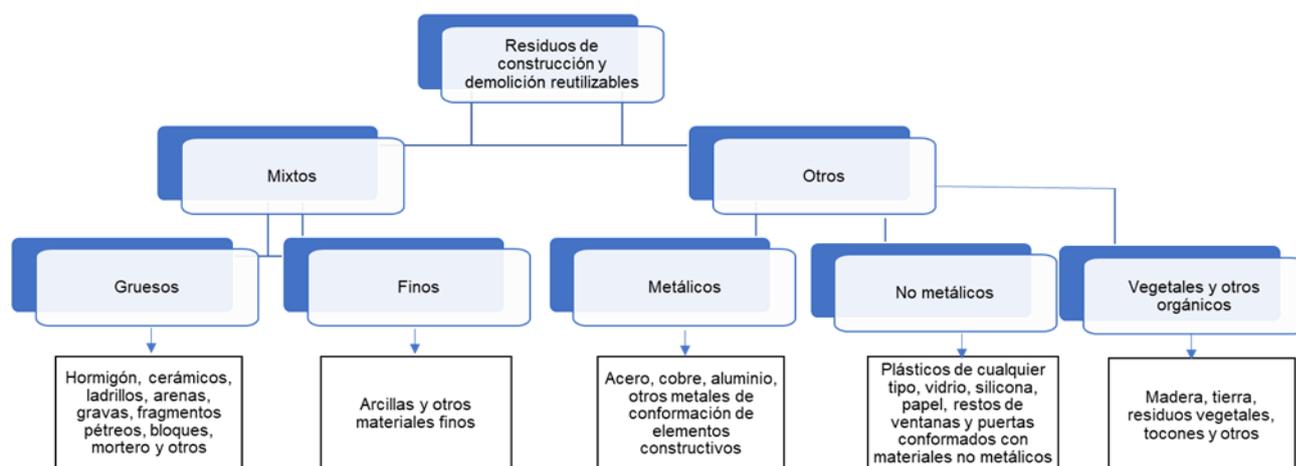


Figura 4: Clasificación y componentes de residuos de construcción y demolición aprovechables

Existen otros elementos que no son considerados peligrosos, pero que por su complejidad debe tenerse en cuenta para la reutilización de los mismos, por ejemplo, como componente de prefabricados. Tal es el caso del yeso [34, 35]. Por otra parte, la gestión de la construcción, remodelación o desmantelamiento, se convierte en un punto clave para evitar la contaminación de los RCD, categoría solo descrita someramente en este artículo. A continuación, se abordarán las diferentes formas de gestión de los RCD en los últimos años.

2.3. La Gestión De Los Residuos De Construcción Y Demolición, La Industria De La Construcción Y El Medioambiente

De acuerdo con las fuentes consultadas, los procesos gestión de contratos, logística [36, 37], reutilización y prácticas de clasificación in situ, inciden en la ruta crítica para la gestión de los residuos [38]. A criterio de los autores de esta revisión, la complejidad del manejo, recuperación y disposición de los RCD ha provocado que casi se trate como otra industria.

La economía circular y la sostenibilidad son conceptos manejados en las publicaciones de los últimos años relacionados con el impacto medioambiental de la industria de la construcción y el reciclaje. Las referencias consultadas refieren directamente el tema, realizando un análisis importante sobre las legislaciones existentes en cada país o región.

Dentro de estas legislaciones, marca tendencia el denominado “Pacto Verde” para la comunidad europea [40, 41]. Este pacto establece criterios y acciones para hacer sostenible la economía europea, viendo los problemas ambientales como oportunidades. En este pacto, la industria de la construcción es un tema medular para la contribución de Europa como región, a las metas que establecen los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas [39, 40].

Un análisis de las formas de gestión recogidas en la Directiva 2008/98 del Parlamento Europeo para la recuperación de recursos desde los residuos, permite establecer un vínculo muy directo con la jerarquía de gestión de residuos implementada por la UE en el año 2008 [41]. Sus bases ya se habían implementado en Japón en el año 2000, con la denominada “*Sound material-cycle society*”, que constituye una expresión de la economía circular. Esta jerarquía persigue minimizar el efecto negativo de la generación de residuos, con influencia directa de los sistemas de gestión, y mejorar la eficiencia en la recuperación de recursos. La jerarquía se representa mediante una pirámide invertida donde la situación más deseada es el borde superior y la menos deseada, el borde inferior. Tal como puede apreciarse en el esquema de la figura 5, la jerarquización de la gestión establece cinco procesos en el siguiente orden, de la cima al fondo: prevención, reutilización, reciclaje, valorización y eliminación [42].



Figura 5: Pirámide de jerarquización de los RCD según [42]

En el caso de la gestión de los residuos de construcción y demolición, el Parlamento Europeo establece una estrategia que apunta: “La sostenibilidad del sector de la construcción es crucial para alcanzar el objetivo a largo plazo de la UE de reducir entre un 80% y un 95% las emisiones de gases de efecto invernadero”. El sector de la construcción se responsabilizaría por tanto, de disminuir el impacto de sus actividades entre un 30% y un 50% para el 2030 y un 90% para el 2050 [40, 43], meta que solo es posible alcanzarla con el apoyo político de los estados miembros.

Pero, ¿por qué la industria de la construcción sería, en parte, responsable de una economía baja en carbono al 2050? Existen varios reportes que fundamentan el impacto negativo de la actividad de la industria de la construcción sobre el medioambiente. Tal como se introdujo en esta revisión, solo por empezar, las actividades de minería relacionadas con las nuevas construcciones demandadas por el incremento poblacional y otras razones, implican una extracción de recursos naturales, por ejemplo, para la fabricación de cemento y áridos, que comienzan apuntando a una industria poco amigable con el medioambiente [44].

Varios estudios señalan que esta industria es responsable de la extracción del 40% de minerales y marcan la gestión de los residuos generados por su actividad como punto crucial para la recuperación de recursos [1, 2, 6, 19, 31]. Sin embargo, si se comparan los reportes mundiales relacionados con esta temática, pocos refieren o evalúan, todo el universo que implica la industria de la construcción en términos de sostenibilidad [36, 45-47]. Menos aún, intentar proponer la implementación de indicadores normalizados para evaluar la sostenibilidad de la industria de la construcción [48] o dar la relevancia que tiene la responsabilidad extendida del productor para potenciar una industria amigable con el medioambiente [49]. Estos últimos aspectos resultan trascendentales, por cuanto inciden en la fiabilidad de los datos que hoy no permiten establecer la línea base real del universo de la construcción, aspecto que ya se discutió brevemente en el acápite anterior.

Las herramientas más utilizadas para la evaluación del impacto ambiental de la actividad de la construcción son: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) [24, 50-54], la Huella de Carbono [36, 53-55] y las Producciones más Limpias (PML) [5, 56-59]. Revisando los reportes de los países de mayor incidencia en la generación de RCD per cápita resulta interesante observar que los pocos que refieren a Macao, realmente se centran en el cinturón de *Greater Bay Area* y el impacto del pavimento de las autopistas en esta región [60]. Para Kuwait existen mayores reportes y las aproximaciones son a modelos circulares en la gestión de estos residuos [61, 62].

Para los Emiratos Árabes Unidos, la literatura se centra en el reciclado o reuso del árido presente en los RCD y utiliza como herramienta principal el ACV y a pesar de que aparecen tres referencias en revistas de impacto, todas se refieren al mismo trabajo [63]. Para la Unión Europea existen muchas referencias [40, 42, 64-66], al igual que para China [17, 56, 60, 67, 68]. En ambos casos abordan desde las legislaciones hasta la necesaria transición hacia enfoques de economía circular. En este punto resulta interesante destacar estudios que comparan Europa con China sobre la base de los flujos de materiales totales en la generación de RCD [69] o entre Brasil, la Unión Europea y EE.UU. [70], y, como se había comentado en el acápite anterior, hacer comparaciones sobre números absolutos puede desvirtuar una realidad que dista de lo que se discute.

2.4. Influencia De Los Áridos Reciclados En Morteros Y Hormigones

Son numerosos los reportes encontrados que versan sobre el empleo de RCD en la fabricación de morteros y hormigones, y su potencial como fuente de recursos de otras esferas de la industria. De las publicaciones recientes, un alto porcentaje se centra en el empleo de los AR como sustitutos de los áridos naturales.

En la bibliografía consultada [7, 8, 10, 30, 34, 67, 68, 71-79] se constata que el empleo de AR se limita fundamentalmente por la presencia remanente de mortero viejo adherido. En estas publicaciones se infiere que el mortero adherido a los áridos influye negativamente en el por ciento de absorción de agua del árido proveniente de los RCD o la absorción capilar del hormigón o mortero al que se destina; también en la adherencia entre áridos y aglomerante, ya sea hidráulico o asfáltico; y en algunas de las propiedades mecánicas del hormigón. Se coincide en que la separación del mortero adherido en los áridos provenientes de los RCD es una premisa para elevar la calidad del producto, lo que constituye un proceso extra que hay que gestionar adecuadamente para que sea viable y económico.

En [67, 68], se concluye que con la incorporación de AR, la pérdida de resistencia a compresión del hormigón es más sensible que la pérdida de las resistencias a tracción y flexión. En la mayoría de las fuentes consultadas se plantea que la relación agua/cemento y la absorción de agua del AR tienen efectos negativos en la calidad del hormigón [7, 34, 67, 68, 71-79]. Algunos autores [30, 34] proponen acotar la aplicación de los AR a algunos proyectos viales, o algunas partes menores de estructuras principales.

Para la eliminación del efecto negativo del mortero adherido a los áridos se proponen diferentes alternativas, que van desde la eliminación de este mediante procedimientos mecánicos, hasta el empleo de tecnologías especiales para mejorar sus propiedades. Por ejemplo, [71] evalúa las propiedades de AR recuperados de hormigón triturado a los que se le aplica impregnación con microsilica. En dicho estudio se aprecia que tras el tratamiento con microsilica, se produce una mejora significativa de las propiedades físicas y mecánicas del AR, en particular la resistencia a compresión del hormigón producido, por lo que este tratamiento puede mejorar su aplicación a mayor escala.

En la continua búsqueda de la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón conteniendo AR, se han incorporado a este material fibras de acero y de polipropileno [10]. Los resultados de esta investigación indican que la incorporación de fibras de polipropileno produce una reducción menos significativa en la resistencia a compresión del hormigón elaborado con AR a medida que se incrementa la proporción de este. Si se emplean fibras de acero, aumenta la resistencia a compresión, flexión e impacto. Con el empleo de fibras híbridas de acero y polipropileno en mezclas de hormigón, se produce un excelente efecto en las propiedades mecánicas del hormigón conteniendo AR. Según esta fuente [10], el hormigón conteniendo AR adicionado con fibras híbridas en proporción de un 1,5% de fibras de acero y un 0,9% de fibras de polipropileno muestra las más elevadas propiedades mecánicas.

Una de las fuentes consultadas evalúa el efecto del empleo de AR en la resistencia a torsión de hormigones autocompactantes [9], aspecto muy esencial en el análisis de las estructuras sometidas a cargas sísmicas y de viento. En la investigación, el hormigón autocompactante se conforma con AR reforzados con fibras de acero. Se hormigonaron vigas con hormigón de 20 MPa y 80 MPa con árido grueso natural y reciclado. Las propiedades mecánicas evaluadas demostraron que es posible combinar fibras de acero con hormigón autocompactante conteniendo AR y que estas no difieren de forma general a cuando se conforma el hormigón autocompactante a partir de áridos naturales.

Otro de los procedimientos empleados para elevar las propiedades de los AR es el que se conoce como "secuestro de carbono". Según [34, 35], la inyección de CO₂ se ha empleado para mejorar la calidad general del hormigón de AR. Actualmente, existen dos metodologías principales para el secuestro de CO₂ en el hormigón: el acondicionamiento con carbono, que consiste en la inyección de CO₂ en el AR; y el curado con carbono, que implica el secuestro de CO₂ en la pasta de cemento del hormigón nuevo [72, 73]. Aunque ambas tecnologías permiten que el hormigón de AR alcance mejores propiedades mecánicas y de durabilidad, el acondicionamiento con carbono es una mejor alternativa para la aplicación práctica [72].

Ahora bien, si los nuevos materiales tienen componentes reciclados: ¿qué ocurrirá cuando el ciclo se repita varias veces? ¿cómo evaluar las características de estos materiales reciclados, del reciclado y vuelto a reciclar? Algunas sugerencias ya se publican en [74], indicando el uso de tecnologías como la microtomografía computarizada para evaluar con precisión las características de estos materiales y advirtiendo que el número de ciclos es por supuesto, finito.

Cuba no está ajena a la situación general que caracteriza el proceso de evaluación de las propiedades de los AR en la producción de morteros y hormigones, particularmente la que caracteriza al del resto de los países en vías de desarrollo, aún insuficiente con independencia de las investigaciones realizadas. En revistas de impacto, que son las que compendia este artículo, sólo se tuvo acceso a cinco experiencias del empleo en Cuba de RCD [75-79], aunque se tienen criterios de reportes de otras investigaciones publicadas en otras revistas de menor impacto.

Una de las publicaciones referenciadas en los últimos cinco años [75] evalúa la influencia del árido fino obtenido de RCD en las propiedades del mortero de albañilería con áridos reciclados. En esta investigación se sustituye el 100% de la arena por dos tipos de AR finos, tipo cerámico y tipo hormigón, en fracciones de 4,76 mm y menor. Se comprueba que en todos los casos, el empleo de AR influye positivamente en la retención de agua de los morteros de albañilería; que el empleo de fracciones muy finas de AR de origen cerámico tiene efecto negativo sobre el proceso de fraguado y endurecimiento, por lo que sólo debe emplearse en enlucidos o uniones simples en interiores; sin embargo, si se mezclan ambos tipos de residuos, o si se emplea el AR tipo hormigón con tamaño máximo de 4,76 mm, los morteros obtenidos presentan propiedades que no difieren significativamente con los producidos con arenas naturales.

En otras investigaciones realizadas en Cuba se analiza la influencia de los AR en las propiedades de hormigones asfálticos.

En un artículo publicado en la revista *Sustainability* [76], se evalúan a nivel de laboratorio las propiedades del hormigón asfáltico en caliente fabricado con AR. Se demuestra en la investigación que el empleo de AR tipo hormigón constituye una alternativa técnicamente viable en la fabricación de hormigón asfáltico. Los autores logran sustituir hasta en un 40% de la fracción gruesa por AR sin que se afecten significativamente, e incluso mejorando, las propiedades del hormigón asfáltico fabricado con áridos naturales, con el correspondiente beneficio medioambiental y económico.

Muy similar al anterior, otros estudios corroboran la factibilidad de empleo de AR grueso en la fabricación también de hormigones asfálticos en Cuba [77-78]. En [77] se evalúan las propiedades de mezclas asfálticas en caliente fabricadas con diferentes porcentajes de AR de la fracción 5–13 mm, determinando las principales propiedades del hormigón asfáltico en términos de densidad, vacíos, estabilidad y deformación, así como el contenido óptimo de asfalto y se midió la sensibilidad al agua, el módulo de rigidez y la deformación permanente. Los resultados corroboran el potencial para el uso de estas fuentes de RCD como AR en el hormigón asfáltico, y muestran, similar a la anterior investigación, que las mezclas asfálticas en caliente con hasta un 40 % de sustitución de agregado natural por agregado reciclado presentan un buen comportamiento.

Una investigación publicada en la revista *Crystals* [75], analiza el rendimiento de morteros fabricados con AR mediante la adición de toba cinerítica zeolizada cubana. En ella se demuestra que, al ser el proceso de reciclaje muy selectivo y que el material de desecho no siempre posee propiedades satisfactorias debido a la naturaleza intrínseca de los desechos, al mezclarlos con toba cinerítica zeolizada de procedencia cubana en distintas proporciones normalizadas, se superan las insuficiencias que presenta tradicionalmente el empleo de AR, logrando el incremento notable de la resistencia a compresión, lo que garantiza la posibilidad de su empleo en morteros estructurales.

Los autores del artículo tienen conocimiento de otras investigaciones realizadas en el país sobre la influencia del empleo de los AR en las propiedades de morteros y hormigones, a los que no se hace mención debido a que sus resultados no se han publicado en revistas de impacto en los últimos cinco años, pero sí pueden servir de referentes en el desarrollo de la presente investigación.

3. CONCLUSIONES

La industria de la construcción tiene un encargo social muy fuerte a la vez que consume importantes cantidades de recursos naturales para lograr sus objetivos. La generación de RCD y el impacto que provoca cuando no se gestionan adecuadamente, son puntos críticos a resolver en una agenda al 2050. A pesar del repositorio de resultados científicos y prácticos en estas temáticas, sigue siendo una deuda, la adquisición de datos fiables de los residuos. Las herramientas de análisis de ciclo de vida, la huella de carbono y las producciones más limpias pueden potenciar aún más los planes de acción a ejecutar con criterios circulares. La búsqueda de nuevos materiales y técnicas para mejorar las propiedades de los materiales resultantes del reuso o reciclado, tiene que ser una tarea permanente tanto de académicos como de empresarios o actores sociales y económicos interesados en la temática. El soporte legal implementado en la UE debe ser referente para el resto de los países.

1. H. Duan, T. R. Miller, G. Liu, and V. W. Tam, "Construction debris becomes growing concern of growing cities," *Waste Management*, vol. 83, pp. 1-5, 2019.
2. A. O. Daoud, A. A. E. Othman, O. J. Ebohon, and A. Bayyati, "Analysis of factors affecting construction and demolition waste reduction in Egypt," *International Journal of Construction Management*, vol. 23, no. 8, pp. 1395-1404, 2023.
3. S. H. Ghaffar, M. Burman, and N. Braimah, "Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery," *Journal of cleaner production*, vol. 244, p. 118710, 2020.
4. D. Guo and L. Huang, "The state of the art of material flow analysis research based on construction and demolition waste recycling and disposal," *Buildings*, vol. 9, no. 10, p. 207, 2019.
5. L. A. L. Ruiz, X. R. Ramón, and S. G. Domingo, "The circular economy in the construction and demolition waste sector—A review and an integrative model approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 248, p. 119238, 2020.
6. J.-L. Gálvez-Martos and I.-R. Istrate, "Construction and demolition waste management," in *Advances in construction and demolition waste recycling*: Elsevier, 2020, pp. 51-68.
7. G. Bai, C. Zhu, C. Liu, and B. Liu, "An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties," *Construction and building materials*, vol. 240, p. 117978, 2020.
8. R. L. Ferreira, M. A. Anjos, C. Maia, L. Pinto, A. R. de Azevedo, and J. de Brito, "Long-term analysis of the physical properties of the mixed recycled aggregate and their effect on the properties of mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 274, p. 121796, 2021.
9. K. S. Nitesh, S. V. Rao, and P. R. Kumar, "An experimental investigation on torsional behaviour of recycled aggregate based steel fiber reinforced self compacting concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 22, pp. 242-251, 2019.
10. W. He, X. Kong, Y. Fu, C. Zhou, and Z. Zheng, "Experimental investigation on the mechanical properties and microstructure of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 261, p. 120488, 2020.
11. A. Sharma and R. Sharma, "Effect of addition of construction–demolition waste on strength characteristics of high plastic clays," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 4, no. 1, p. 27, 2019.
12. D. Youventharan, P. Ramandhansyah, K. Jeevithan, O. Rokiah, S. M. Arif, and H. Yaacob, "Durability Performance of Concrete Debris and Bottom Ash as an Alternative Track Ballast Material," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 682, no. 1: IOP Publishing, p. 012053.
13. B. Bagriacik, "Utilization of alkali-activated construction demolition waste for sandy soil improvement with large-scale laboratory experiments," *Construction and Building Materials*, vol. 302, p. 124173, 2021.
14. B. Bagriacik and B. Mahmutluoglu, "A new experimental approach to the improvement of sandy soils with construction demolition waste and cement," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, pp. 1-11, 2020.
15. I. V. Jelić, D. Antonijević, M. Z. Šljivić-Ivanović, and S. Dimović, "Application of composite construction and demolition debris in heavy metals removal from industrial wastewater," *Thermal Science*, vol. 27, no. 1 Part A, pp. 1-10, 2023.
16. C. Europea, "Protocolo de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en la UE," ed: ECORYS Brussels, Belgium, 2016.
17. M. S. Aslam, B. Huang, and L. Cui, "Review of construction and demolition waste management in China and USA," *Journal of Environmental Management*, vol. 264, p. 110445, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>.
18. R. Islam, T. H. Nazifa, A. Yuniarto, A. S. Uddin, S. Salmiati, and S. Shahid, "An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling," *Waste management*, vol. 95, pp. 10-21, 2019.
19. N. Cho, M. El Asmar, and M. Aldaaja, "An Analysis of the Impact of the Circular Economy Application on Construction and Demolition Waste in the United States of America," *Sustainability*, vol. 14, no. 16, p. 10034, 2022.
20. E. P. A. (EPA). "Sustainable management of construction and demolition materials." <https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials> (accessed June, 2023).
21. S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications, 2018.
22. U. N. S. Division. "Country Files from the UNSD/UNEP data collection on environment statistics." United Nations. https://unstats.un.org/unsd/envstats/country_files (accessed June, 2023).

23. Eurostat. "Statistics of waste generation and treatment." European Union. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASTRT/default/table (accessed June, 2023).
24. V. Ram, K. C. Kishore, and S. N. Kalidindi, "Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an Indian case study using life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 255, p. 120258, 2020.
25. C. P. Ginga, J. M. C. Ongpeng, and M. K. M. Daly, "Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production," *Materials*, vol. 13, no. 13, p. 2970, 2020.
26. B. Van Hoof, G. Núñez, and C. J. De Miguel. Metodología para la evaluación de avances en la economía circular en los sectores productivos de América Latina y el Caribe, 2022 2022.
27. B. Mundial. "Datos población mundial." <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.PO.P.TOTL> (accessed June, 2023).
28. S. M. Elgizawy, S. M. El-Haggar, and K. Nassar, "Approaching sustainability of construction and demolition waste using zero waste concept," *Low carbon economy*, vol. 7, no. 1, pp. 1-11, 2016.
29. V. Papastamoulis, K. London, Y. Feng, P. Zhang, R. Crocker, and P. Patias, "Conceptualising the circular economy potential of construction and demolition waste: An integrative literature review," *Recycling*, vol. 6, no. 3, p. 61, 2021.
30. R. A. Robayo-Salazar, W. Valencia-Saavedra, and R. Mejía de Gutiérrez, "Construction and demolition waste (CDW) recycling—As both binder and aggregates—In alkali-activated materials: A novel re-use concept," *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5775, 2020.
31. B. Galán, J. Viguri, E. Cifrian, E. Dosal, and A. Andres, "Influence of input streams on the construction and demolition waste (CDW) recycling performance of basic and advanced treatment plants," *Journal of Cleaner Production*, vol. 236, p. 117523, 2019.
32. Y. Zhang et al., "Adaptive construction of the virtual debris flow disaster environments driven by multilevel visualization task," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 5, p. 209, 2019.
33. C. A. Pacheco Bustos, L. G. Fuentes Pumarejo, É. H. Sánchez Cotte, and H. A. Rondón Quintana, "Construction demolition waste (CDW), a perspective of achievement for the city of Barranquilla since its management model," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 35, no. 2, pp. 533-555, 2017.
34. M. Antunes, A. Sá, P. Oliveira, and E. Rangel, "Utilization of gypsum from construction and demolition waste in Portland cement mortar," *Cerâmica*, vol. 65, pp. 1-6, 2019.
35. G. Bumanis, J. Zorica, A. Korjamins, and D. Bajare, "Processing of Gypsum Construction and Demolition Waste and Properties of Secondary Gypsum Binder," *Recycling*, vol. 7, no. 3, p. 30, 2022.
36. N. C. Onat and M. Kucukvar, "Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, p. 109783, 2020.
37. E. Taghavi, A. Fallahpour, K. Y. Wong, and S. A. Hoseini, "Identifying and prioritizing the effective factors in the implementation of green supply chain management in the construction industry," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 2, pp. 97-106, 2021.
38. A. Nawaz, J. Chen, and X. Su, "Factors in critical management practices for construction projects waste predictors to C&DW minimization and maximization," *Journal of King Saud University-Science*, vol. 35, no. 2, p. 102512, 2023.
39. N. Unidas. "Objetivos de desarrollo sostenible." <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accessed June, 2023).
40. A. Bonoli, S. Zanni, and F. Serrano-Bernardo, "Sustainability in building and construction within the framework of circular cities and european new green deal. The contribution of concrete recycling," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2139, 2021.
41. P. Europeo. "DIRECTIVA 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas." *Diario oficial de la Unión Europea*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj> (accessed June, 2023).
42. C. Zhang, M. Hu, F. Di Maio, B. Sprecher, X. Yang, and A. Tukker, "An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe," *Science of the Total Environment*, vol. 803, p. 149892, 2022.
43. P. Europeo. "COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO Y AL CONSEJO. Estrategia para una competitividad sostenible del sector de la construcción y de sus empresas." *Comisión Europea*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX:52012DC0433> (accessed June, 2023).

44. G. L. F. Benachio, M. d. C. D. Freitas, and S. F. Tavares, "Circular economy in the construction industry: A systematic literature review," *Journal of cleaner production*, vol. 260, p. 121046, 2020.
45. O. Babalola, E. O. Irem, and I. C. Ezema, "Implementation of lean practices in the construction industry: A systematic review," *Building and environment*, vol. 148, pp. 34-43, 2019.
46. M. U. Hossain, S. T. Ng, P. Antwi-Afari, and B. Amor, "Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 130, p. 109948, 2020.
47. S. Jain, S. Singhal, N. K. Jain, and K. Bhaskar, "Construction and demolition waste recycling: Investigating the role of theory of planned behavior, institutional pressures and environmental consciousness," *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121405, 2020.
48. B. Cheng, K. Lu, J. Li, H. Chen, X. Luo, and M. Shafique, "Comprehensive assessment of embodied environmental impacts of buildings using normalized environmental impact factors," (in English), *Journal of cleaner production*, Article vol. 2022 v.334, pp. pp. 130083-, 0000 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130083.
49. S. Shoosharian, T. Maqsood, P. S. Wong, M. Khalfan, and R. J. Yang, "Extended producer responsibility in the Australian construction industry," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 620, 2021.
50. B. Bayram and K. Greiff, "Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: A systematic review analyzing three important quality aspects," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 1-23, 2023.
51. Y. Tang et al., "Natural gravel-recycled aggregate concrete applied in rural highway pavement: Material properties and life cycle assessment," (in English), *Journal of cleaner production*, Article vol. 2022 v.334, pp. pp. 130219-, 0000 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130219.
52. Y. Zhang, W. Luo, J. Wang, Y. Wang, Y. Xu, and J. Xiao, "A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 115-125, 2019.
53. J. M. C. Ongpeng and C. P. Ginga, "Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Analysis of Recycled Aggregates in the Construction of Earth-Retaining Walls During Reconstruction," *Advances of Footprint Family for Sustainable Energy and Industrial Systems*, pp. 15-34, 2022.
54. C. Rivero-Camacho, J. Solís-Guzmán, M. D. Alba-Rodríguez, and M. Marrero, "Life-cycle assessment of nonhazardous construction and demolition waste. Application of carbon footprint indicator," in *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*: Elsevier, 2020, pp. 453-473.
55. S. Khan, N. Mir, A. Kul, O. Şahin, M. Şahmaran, and M. Koc, "Renewable energy for carbon footprint reduction of green geopolymers material's production for built-environment," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 852-858, 2022.
56. P. Ghisellini, X. Ji, G. Liu, and S. Ulgiati, "Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 195, pp. 418-434, 2018.
57. P. Ghisellini, M. Ripa, and S. Ulgiati, "Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 178, pp. 618-643, 2018.
58. K. Chen, J. Wang, B. Yu, H. Wu, and J. Zhang, "Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, p. 125071, 2021.
59. L. Shi, J. Liu, Y. Wang, and A. Chiu, "Cleaner production progress in developing and transition countries," vol. 278, ed: Elsevier, 2021, p. 123763.
60. Q. Liu, Z. Wang, N. Zhang, J. Zuo, H. Feng, and H. Duan, "Characterizing the impacts of highway pavement in a newly planned greater bay area economic belt in China," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, no. 6, pp. 1285-1297, 2021.
61. H. Al-Raqeb, S. H. Ghaffar, M. J. Al-Kheetan, and M. Chougan, "Understanding the Challenges of Construction Demolition Waste Management Towards Circular Construction: Kuwait Stakeholder's Perspective," *Cleaner Waste Systems*, p. 100075, 2023.
62. M. B. H. Almusawi, A. T. B. A. Karim, and S. Ethaib, "Evaluation of Construction and Demolition Waste Management in Kuwait," *Recycling*, vol. 7, no. 6, p. 88, 2022.
63. M. H. Alzard, H. El-Hassan, and T. El-Maaddawy, "Environmental and economic life cycle assessment of recycled aggregates concrete in the United Arab Emirates," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10348, 2021.

64. P. V. Sáez and M. Osmani, "A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union," *Journal of Cleaner Production*, vol. 241, p. 118400, 2019.
65. J. Moschen-Schimek, T. Kasper, and M. Huber-Humer, "Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste in the European Union—An analysis of influencing factors in selected EU countries," *Waste Management*, vol. 167, pp. 150-164, 2023.
66. G. L. Taboada, I. Seruca, C. Sousa, and Á. Pereira, "Exploratory data analysis and data envelopment analysis of construction and demolition waste management in the European Economic Area," *Sustainability*, vol. 12, no. 12, p. 4995, 2020.
67. M. Ma, V. W. Tam, K. N. Le, and W. Li, "Challenges in current construction and demolition waste recycling: A China study," *Waste Management*, vol. 118, pp. 610-625, 2020.
68. H. Yuan, "Barriers and countermeasures for managing construction and demolition waste: A case of Shenzhen in China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 157, pp. 84-93, 2017.
69. J. Hao, F. Di Maria, Z. Chen, S. Yu, W. Ma, and L. Di Sarno, "Comparative study of construction and demolition waste management in China and the European Union," *Detritus*, vol. 13, pp. 114-121, 2020.
70. K. Nunes and C. Mahler, "Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA," *Waste Management & Research*, vol. 38, no. 4, pp. 415-422, 2020.
71. P. Saravanakumar, K. Abhiram, and B. Manoj, "Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics," *Construction and Building Materials*, vol. 111, pp. 611-617, 2016.
72. V. W. Tam, A. Butera, K. N. Le, and W. Li, "Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete: A critical review," *Construction and Building Materials*, vol. 250, p. 118903, 2020.
73. B. A. Tayeh, D. M. Al Saffar, and R. Alyousef, "The utilization of recycled aggregate in high performance concrete: a review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 8469-8481, 2020.
74. C. Thomas, J. De Brito, A. Cimentada, and J. Sainz-Aja, "Macro-and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 245, p. 118843, 2020.
75. I. Martínez, M. Etxeberria, E. Pavón, and N. Díaz, "Influence of demolition waste fine particles on the properties of recycled aggregate masonry mortar," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 16, pp. 1213-1226, 2018.
76. D. Acosta Alvarez, A. Alonso Aenlle, and A. J. Tenza-Abril, "Laboratory evaluation of hot asphalt concrete properties with Cuban recycled concrete aggregates," *Sustainability*, vol. 10, no. 8, p. 2590, 2018.
77. D. Acosta Alvarez, A. Alonso Aenlle, A. J. Tenza-Abril, and S. Ivorra, "Influence of partial coarse fraction substitution of natural aggregate by recycled concrete aggregate in hot asphalt mixtures," *Sustainability*, vol. 12, no. 1, p. 250, 2019.
78. J. Morales Fournier, D. Acosta Álvarez, A. Alonso Aenlle, A. J. Tenza-Abril, and S. Ivorra, "Combining reclaimed asphalt pavement (RAP) and recycled concrete aggregate (RCA) from Cuba to obtain a coarse aggregate fraction," *Sustainability*, vol. 12, no. 13, p. 5356, 2020.
79. D. A. Martín, J. L. Costafreda, and L. Presa, "Improving the Performance of Mortars Made from Recycled Aggregates by the Addition of Zeolitised Cineritic Tuff," *Crystals*, vol. 12, no. 1, p. 77, 2022.