

04-028

## **CIRCULAR ECONOMY OF NON-STRUCTURAL MINING WASTE: FROM WASTE TO RESOURCE**

Díaz Piloñeta, Marina; Ortega Fernández, Francisco; Martínez Huerta, Gemma; Mateo Pérez, Vanesa

Universidad de Oviedo

Tailings are an inherent waste to the mining industry. Given current environmental trends, a radical shift in mining towards more sustainable actions is needed. Dry-stacked tailings offer the best water management, the lowest storage risks and the greatest rehabilitation possibilities.

Unfortunately, dry storage is not the ultimate solution either. It is not sustainable to occupy such quantities of material with the environmental degradation that this entails. Potential applications for these tailings have been sought for years. Some tailings have great potential for use, basically those that have the capacity to be combined to form concretes or bases, generally characterised by great structural stability. However others, those less homogeneous and even volumetrically unstable, are not treated in a general way. This study shows possible applications of these materials with a double objective: to make tailings disappear as waste and to reduce the extraction of raw materials.

**Keywords:** *mining waste; circular economy; artificial resources*

## **ECONOMÍA CIRCULAR DE LOS RESIDUOS MINEROS NO ESTRUCTURALES: DE RESIDUO A RECURSO**

Los relaves son un residuo inherente a la industria minera. Dadas las tendencias ambientales actuales, es necesario un cambio radical en la minería hacia acciones más sostenibles. Los relaves apilados en seco ofrecen la mejor gestión del agua, los menores riesgos de almacenamiento y las mayores posibilidades de rehabilitación.

Lamentablemente, el almacenamiento seco tampoco es solución última. NO es sostenible ocupar tales cantidades de material con el deterioro ambiental que esto supone. Desde hace años se han buscado posibles aplicaciones para estos relaves. Algunos relaves tienen un gran potencial de utilización, básicamente aquellos que tienen capacidad de ser combinados para formar hormigones o bases, generalmente caracterizados por una gran estabilidad estructural. Sin embargo otros, aquellos menos homogéneos e incluso volumétricamente inestables, no son tratados de forma general. Este estudio muestra posibles aplicaciones de dichos materiales con un doble objetivos: hacer desaparecer los relaves como residuos y reducir la extracción de materias primas.

**Palabras clave:** *residuos mineros; economía circular; recursos artificiales*

Correspondencia: marina.diaz@api.uniovi.es

Acknowledgements/Agradecimientos: Proyecto parcialmente subvencionado por el Gobierno del Principado de Asturias a través del contrato IDI 2018/000225



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Para el año 2030, se espera que la demanda de agua supere a la oferta disponible en un 40% (Ramachandran, 2018), por lo que, no en vano, conseguir realizar una correcta gestión de los recursos hídricos es uno de los principales retos de este siglo a nivel mundial. Los suministros humanos y usos agrícolas son las principales demandas a satisfacer, y están aumentando. Esto implica que, en caso de periodos de escasez, la industria será la más afectada. Dentro de los usos industriales, las operaciones mineras consumen una fracción muy importante del agua, lo que también lleva asociado un gran impacto en el medio ambiente.

El agua es uno de los problemas más críticos en el sector, en primer lugar, porque a medida que las calidades minerales disminuyen, se necesita más agua para extraer la misma cantidad de material. Para agravar el problema, muchos minerales se extraen en lugares remotos o en climas áridos, donde se convierte en un bien aún más preciado. Debido a ello, las estimaciones indican que para el año 2030, aproximadamente el 25% de la producción minera será vulnerable ante riesgos relacionados con el clima, como la escasez de agua (Soliman, Fletcher & Crocker, 2017). Acorde con este pronóstico, según Deloitte, una de las principales tendencias en minería de los últimos años es la inevitable reducción del consumo de agua en el sector (Deloitte, 2018, sección Water Management; Deloitte, 2019, sección Exploring the water-energy nexus).

A medida que aumenta la competencia por los suministros de agua, muchas compañías mineras están tomando medidas para reducir su uso y dependencia. Uno de los campos en los que se está invirtiendo cada vez más para lograr este objetivo está estrechamente relacionado con el diseño de las instalaciones de almacenamiento y gestión de los relaves (TSF por sus siglas en inglés), los principales residuos producidos en esta industria (Deloitte, 2019). Por ejemplo, la compañía Goldcorp lanzó en 2017 su estrategia llamada *Towards Zero Water* (H2Zero), que tiene como objetivo eliminar completamente el almacenamiento convencional de relaves en forma de lodo y reducir sustancialmente el consumo de agua dulce gracias a los relaves filtrados o EcoTails (Goldcorp, 2017).

Los relaves son una consecuencia inevitable de la mayoría de las operaciones mineras y la gestión de su almacenamiento suele implicar un gran consumo de agua. Además, los fallos o el mal funcionamiento de las instalaciones pueden tener un importante impacto en el medio ambiente, con resultados catastróficos. De hecho, el fracaso en la gestión de estas instalaciones ha motivado muchos cierres prematuros de minas. A pesar de que no se puede identificar como la única causa de fallo, uno de los factores comunes que contribuyen indudablemente al colapso, es el comportamiento del agua dentro de la instalación (Klohn Crippen Berger, 2017). Esta situación ha llevado a la industria minera a considerar y desarrollar nuevas tipologías de almacenamiento, incluyendo la deshidratación de los relaves antes de su deposición, lo que no sólo implicaría el reciclaje y reutilización del agua, sino también una mejora de seguridad en las instalaciones.

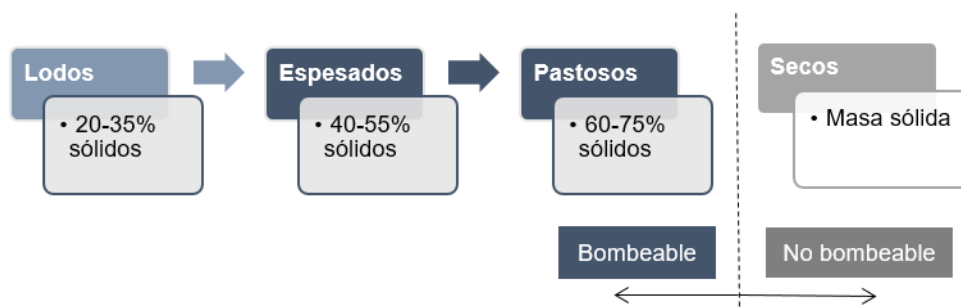
Además de la reducción del agua, la reutilización de estos residuos es otra de las principales tendencias en el sector. En el año 2010 se produjeron aproximadamente 14 mil millones de toneladas de relaves mineros en todo el mundo (Adiansyah et al., 2015). Sin embargo, es muy difícil concretar exactamente cuál es la producción, puesto que varía constantemente. En la década de los 60 se generaban decenas de miles de toneladas diarias que, en el año 2000, ya habían ascendido a cientos de miles de toneladas (Jakubick & McKenna, 2003). Actualmente, algunas minas llegan a producir más de 200.000 toneladas de relaves cada día (Earthworks and MiningWatch Canada, 2012). Según los principios de economía circular, se deben maximizar los recursos disponibles para que éstos permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo, aspirando a reducir todo lo posible la generación de residuos y a aprovechar al máximo aquellos cuya generación no se haya podido evitar.

Concretamente los relaves de minería de hierro, tienen un gran potencial de reutilización, así como un alto nivel de generación. Es muy difícil concretar la producción anual, pero se estima que por cada tonelada de hierro se extraen aproximadamente 400 kg de relaves (Dauce et al., 2018). Solamente en China, se estima que cada año se generan entre 130-170 millones de toneladas de estos residuos (Li et al., 2018), mientras que en Australia asciende a 632 millones (Kuranchie et al., 2015). El presente trabajo realiza un análisis de las dos principales tendencias del sector, comenzando con una comparación entre los métodos de almacenamiento de los relaves y prosiguiendo con una recopilación bibliográfica sobre las posibles aplicaciones de estos residuos, concretamente, los de mineral de hierro por su gran volumen de generación.

## 2. Tipos de almacenamiento de relaves mineros

Como ya se introducía en la sección anterior, el agua es posiblemente el aspecto más importante en la gestión de relaves, tanto en términos de estabilidad física como geoquímica, y es necesaria durante todo el ciclo de vida de las instalaciones de almacenamiento de estos residuos. Por otra parte, los métodos de almacenamiento dependen del grado de deshidratación previo de los relaves. Su estado de deshidratación es un continuo que puede ir desde una lechada fluida o lodo (como el agua), a espesada (como la melaza), a una pasta (como la pasta de dientes), hasta llegar a los relaves filtrados (como un suelo) (Figura 1) (Davis, 2011). El nivel de deshidratación se establece en base al contenido de sólidos y al límite elástico y, en función de éste, los relaves se almacenan en distintos tipos de instalaciones, con un nivel de impacto ambiental diferente (Klohn Crippen Berger, 2017).

**Figura 1. Contenido en sólidos de los tipos de procesamiento de relaves mineros.**



### 1.1. Relaves en forma de lodo

Los relaves en forma de lodo tienen una concentración en sólidos del 20-35% y son la metodología de almacenamiento convencional (Australian Government, 2016). Los residuos se transportan por tubería desde la instalación de procesamiento del mineral hasta un estanque o balsa delimitada por presas de contención donde los sólidos se depositan en el fondo y permanecen bajo una cubierta de agua. Parte del agua liberada de la lechada se acumula en la superficie del estanque y se evapora o reutiliza en la instalación de procesamiento del mineral. Suelen contar con presas más pequeñas aguas abajo del embalse principal para interceptar y recoger el agua infiltrada (Klohn Crippen Berger, 2017).

Es el método más comúnmente utilizado debido a su simplicidad, al no ser necesario ningún tipo de pre-procesamiento, sin embargo, es potencialmente peligroso ya que lleva implícito considerables pérdidas de agua y altas probabilidades de fallo. Todo ello hace que, a pesar de ser el más empleado, sea uno de los más problemáticos, tanto por la necesidad extensiva de agua como por los problemas de colapso de las balsas de almacenamiento (Australian Government, 2016). Además, tras la operación de estas complejas entidades, el cierre de

estos embalses suele representar verdaderos retos tanto a nivel geotécnico, como por la recuperación fisicoquímica del terreno.

## **1.2. Relaves espesados y en forma de pasta**

El espesamiento se utiliza para aumentar el contenido de sólidos aproximadamente a un 40-55%, y reducir la dimensión de las balsas de almacenamiento (Australian Government, 2016). El diseño de la instalación es similar a la anterior, aunque admite pendientes más pronunciadas al tratarse de un material más denso. Siguen siendo necesarias represas de contención, pero de menor tamaño. Estos relaves pueden transportarse en tuberías de menos diámetro, pero normalmente requieren mayores presiones de bombeo y, en ocasiones, estaciones de refuerzo intermedias con densidades más altas y tuberías más largas, lo que tiene una repercusión importante en el coste. En lo que se refiere a la gestión del agua dentro de la instalación, el volumen acumulado en la superficie de las balsas es mínimo y, en comparación con las instalaciones convencionales, los relaves liberan menos agua a medida que se consolidan. Generalmente, esta agua, junto con la precipitación y la escorrentía, o bien se acumula en estanques superficiales junto a la presa, o bien se deriva a estanques externos, donde puede ser reutilizada en la instalación de procesamiento del mineral (Klohn Crippen Berger, 2017).

En cuanto a los relaves ultra espesados o en forma de pasta, tienen como objetivo aumentar aún más el contenido de sólidos, hasta un 60-75% en peso, para lo cual se requieren espesamientos adicionales o aditivos (Australian Government, 2016). El resultado es una mayor recuperación de agua, descargando menores volúmenes en las balsas de almacenamiento. El caudal de entrada es menor y, por lo tanto, se transportan en tuberías de menor tamaño; sin embargo, se requieren mayores presiones de bombeo y es necesario el empleo de bombas de desplazamiento positivo. Por otra parte, para la gestión de las aguas pluviales, se necesitan estanques de gestión separados de la balsa, al igual que en los dos casos anteriores. Por ello, aunque los costes de capital son generalmente más bajos que en el caso de los relaves espesados y los costes operativos un poco más altos, por lo general suele no diferenciarse entre relaves espesados y pastosos, ya que tienen características muy similares e incluso las instalaciones de almacenamiento siguen un mismo patrón morfológico.

## **1.3. Relaves filtrados**

Aunque la necesidad de gestión del agua y los riesgos potenciales derivados del almacenamiento en forma de lodo se reducen con los relaves espesados y pastosos, todavía es necesaria la construcción de presas de contención, importantes inversiones en la gestión del agua y el transporte por tubería hasta la instalación (Klohn Crippen Berger, 2017). La deshidratación mecánica de los relaves permite eliminar el agua del proceso hasta el punto en el que lleguen a comportarse como un suelo. Se desarrolla una especie de torta parcialmente saturada que se dispone en una pila de relaves secos (Davis, 2011). Durante el filtrado de los relaves, el agua se reutiliza directamente en la planta de procesamiento del mineral, y se recupera casi totalmente. Estos residuos ya son transportables por camión o cinta transportadora y pueden ser colocados, esparcidos o compactados para formar una "pila seca" insaturada, densa y estable, eliminando los peligros derivados de las otras tipologías de almacenamiento y minimizando las pérdidas de agua durante el proceso.

## **1.4. Comparación de tecnologías**

La Tabla 1 (Australian Government, 2016) muestra una comparación de las diferentes tipologías de almacenamiento y gestión de relaves. Los relaves secos o filtrados, no sólo implican una mínima necesidad de gestión del agua, sino que también ofrecen la posible

rehabilitación posterior y favorecen unas condiciones de almacenamiento más seguras al conseguir una masa sólida estable. A nivel mundial, se estima que hay un promedio de dos fallas en las represas de relaves cada año (Williams, 2017). La disposición y almacenamiento de manera convencional, en forma de lodo, puede dar lugar a infiltraciones en los cimientos de las presas causando unos esfuerzos no calculados ni planificados y haciendo de este tipo de almacenamiento una instalación peligrosa. Por ello no es de extrañar que la tendencia global sea la búsqueda de nuevas metodologías más seguras.

Según el gobierno australiano, las dos tendencias principales de las últimas dos décadas en cuanto a metodologías de almacenamiento y gestión de relaves han sido el espesamiento y filtración de los mismos (Australian Government, 2016). Sin embargo, un estudio reciente elaborado por Carneiro y Fourie (2018), sostiene que las técnicas de espesamiento han sido foco de investigación durante más de una década, pero no han logrado una amplia aceptación en la industria, probablemente debido a los elevados costes de operación asociados con el transporte por tubería a tan altas presiones del material y a la necesidad de construcción de presas de contención. Por ello, el interés se ha desplazado hacia los relaves filtrados o secos, ya que son una opción cada vez más atractiva y de menor riesgo físico en comparación con los relaves convencionales, que permite reducir la necesidad de agua y recuperar gran parte del volumen empleado en la extracción del mineral.

**Tabla 1. Comparación de tipologías de almacenamiento y gestión de relaves mineros.**

Consideraciones	Lodos	Espesados/pastosos	Filtrados
Recuperación del agua en el proceso	Ineficiente	Mejorada	Eficiente
Transporte	Bombas centrífugas	Bombas de desplazamiento positivo y/o centrífugas	Transporte terrestre
Almacenamiento	Requiere contención Inestable	Requiere cierta contención Cierta inestabilidad	Mínima contención requerida Masa de relaves estable
Infiltración	Elevada escorrentía y potencial de infiltración	Posible escorrentía y potencial de infiltración	Pérdidas por infiltración insignificantes
Gestión del agua	Extensiva	Reducida	Mínima
Rehabilitación	Difícil	Difícil	Posible rehabilitación progresiva

## 2. Aplicaciones de los relaves secos

Aunque el almacenamiento en seco implique una reducción del consumo de agua y elimine los peligros derivados de las instalaciones de almacenamiento de estos residuos, no es una solución última, ya que siguen siendo necesarias grandes superficies de almacenamiento que llevan implícitas un importante impacto ambiental. Idealmente, la producción de relaves debe minimizarse, pero también debe explotarse cualquier potencial de reutilización, buscando usos alternativos siempre que sea posible. Hay un número cada vez más creciente de investigaciones relacionadas con la búsqueda de posibles aplicaciones, muchas de las cuales requieren el secado de los mismos (Australian Government, 2016). En particular, los relaves de mineral de hierro (IOT por sus siglas en inglés, Iron Ore Tailings) se utilizan a menudo en diferentes campos de la ingeniería civil, desde capas de relleno o construcción de carreteras

donde reemplazan a materiales convencionales, hasta la industria del cemento y cerámica, entre otras aplicaciones. De esta manera se reduce la explotación de materias primas siguiendo los principios de economía circular.

## 2.1. Cemento y hormigón

Existe un gran número de investigaciones relacionadas con el uso de los IOT como sustituto de las materias primas y aditivos en la producción de cemento (Tabla 2), como se muestra en el trabajo elaborado por Li et ál. en 2010 al incorporar escoria de horno alto, clínker, yeso y relaves de mineral de hierro para la fabricación de hormigón. Desde otro punto de vista, la producción del cemento utilizado en el hormigón emite grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que contribuye al efecto invernadero, por lo que también hay muchas otras investigaciones que buscan remplazar directamente el cemento por IOT en la fabricación del hormigón, como es el caso de Huang, Ranade y Li (2013) o Fernandes et al. (2018).

**Tabla 2. Resumen bibliográfico de la utilización de relaves en cemento y hormigón ordenados según año de publicación.**

Revisión	Año	Aplicación	Detalles
Li et ál.	2010	Fabricación de cemento	IOT; escorial de horno alto; clínker y yeso (30:34:30:6)
Arisimunho & Bertocini	2012	Fabricación de cemento	Polvo en el cemento Pórtland
Huang, Ranade & Li	2013	Sustituto del cemento en hormigón	IOT para hormigones flexibles ECC
Zhao, Fan & Sun	2014	Reemplazar la arena natural como árido fino en hormigón	Fabricación de hormigones de altas prestaciones (UHPC)
Uchechukwu & Ezekiel	2014	Sustituir arena y cemento en hormigón	Proporciones de entre 5-30%
Kuranchie et ál.	2015	Sustitución completa de agregados, finos y gruesos en hormigón	
Ma et ál.	2016	Reemplazo de la arena en hormigón	Hormigón Celular en Autoclave (AAC)
Shettima et ál.	2016	Sustitución de áridos finos en hormigón	Valores del 25%, 50%, 75% y 100% de relaves de mineral de hierro
Fernandes et ál.	2018	Sustitución parcial del cemento Pórtland en hormigón	Sustitución del 10, 20 y 30%. Cumplimiento de las normas mecánicas brasileñas
Lv et ál.	2019	Sustitución completa de agregados, finos y gruesos en hormigón	Estudio para la construcción de presas con el hormigón

Además de la sustitución del cemento, el reemplazo de los áridos (tanto finos como gruesos) por IOT ha sido también foco de estudio durante años. El hormigón es un material básico en la construcción y los áridos constituyen al menos el 80% de la mezcla. Sin embargo, la obtención y generación de áridos naturales implica la extracción de recursos naturales, con sus consiguientes efectos ambientales. Según Uchechukwu y Ezekiel (2014), el empleo de relaves de mineral de hierro como sustituto de la arena y el cemento en la fabricación de

hormigón, mejora la trabajabilidad y la resistencia a compresión. Sin embargo, el estudio realizado por Shettima et al. (2016) demostró como la incorporación de estos relaves incrementa la demanda de agua, a pesar de que todos los demás parámetros, como resistencia y módulo de elasticidad, resultan considerablemente mejores.

También se ha estudiado su posible aplicación en hormigones especiales, como en hormigones de altas prestaciones (UHPC) (Zhao, Fan & Sun, 2014) u hormigón celular en autoclave (AAC) (Ma et al., 2016). En el primero de los casos, se encontró una sustitución óptima con el 40% de relaves de mineral de hierro y en el segundo se destacó cómo el óxido de calcio (CaO) presente en los relaves resultó un recurso calcáreo parcialmente alternativo para reducir el consumo de cal.

El estudio más reciente en este campo, trata de una investigación que analiza los beneficios ambientales y económicos conseguidos con la utilización de relaves de hierro a partir de un caso de estudio real (Lv et al., 2019). La investigación analizó la posibilidad de emplear los relaves sustituyendo por completo los áridos utilizados en la construcción de presas, y poder evaluar así su influencia en la construcción. El estudio planteado en la central hidroeléctrica de Yinjiang demuestra que de esta forma se pueden llegar a producir unos ahorros de aproximadamente 12 millones de dólares ya que, para la construcción de la presa de gravedad de hormigón, se plantea utilizar los relaves de mineral de hierro como sustitución completa de áridos naturales, evitando la necesidad de extracción de 2,15 millones de m<sup>3</sup> de materia prima.

## 2.2. Construcción de carreteras

El primer estudio relevante relacionado con el empleo de relaves en la construcción de carreteras fue un trabajo desarrollado en 2011 en China (Sun et al.) (Tabla 3). En él se plantea la posibilidad de utilización de la parte gruesa de los IOT (grava), estabilizada con cemento, en la capa base de las carreteras. Los mismos autores (Sun et al., 2012) plantearon otros métodos de estabilización de los IOT para la misma aplicación (cenizas volantes de piedra caliza), o incluso con escoria de acería, reutilizando de esta forma dos de los principales residuos generados en la producción de acero (De Castro et al., 2016).

**Tabla 3. Resumen bibliográfico de la utilización de relaves en carreteras ordenados según año de publicación.**

Revisión	Año	Aplicación	Detalles
Sun et ál.	2011	Capa base de carreteras	Parte gruesa de los IOT estabilizada con cemento. Mejores resultados que grava convencional
Sun et ál.	2012	Capa base de carreteras	Estabilización de los relaves de mineral de hierro con cenizas volantes de piedra caliza
Longsheng et ál.	2015	Capa base de carreteras	Métodos para mejorar propiedades mecánicas
De Castro et ál.	2016	Capa base de carreteras	Estabilización de los IOT con escoria de acería
Panditharadhya & Ravi Shankar	2017	Pavimentos de hormigón de alto rendimiento	Sustitución óptima con un 40% de IOT
Zhang, Wang & Yan	2018	Capa base/sub-base de carreteras de nivel 2 o inferior	Arena de desecho de fundición y arena de IOT

Por otra parte, una investigación reciente en la India (Panditharadhya & Ravi Shankar, 2017), demuestra su uso efectivo en pavimentos de hormigón de alto rendimiento. Aunque encontraron como la trabajabilidad de las muestras disminuye a medida que aumenta el porcentaje de relaves, consiguieron una sustitución óptima con un 40%. Uno de los trabajos más actuales relacionado con estas aplicaciones es el desarrollado por Zhang, Wang y Yan (2018), que analiza la utilización de arena de desecho de fundición y arena de IOT como materiales para capa base/sub-base de carreteras de nivel 2 o inferior. Ambos residuos se mezclaron con piedras trituradas y cemento como material aglutinante.

### 2.3. Cerámicas y ladrillos

Dentro del sector de la construcción, algunas investigaciones plantean el uso de los relaves para la fabricación de ladrillos (Kuranchie, 2015 y Jia Zhang & Li, 2006) (Tabla 4), incluso su mezcla con otros residuos, como es el caso de estudio planteado por Freitas et ál. (2018) en Brasil, donde analiza la viabilidad de reutilizar los IOT junto con las escorias de acería (BOF) como materias primas. Además de su empleo en ladrillos convencionales, trabajos como el de Kuranchie et al. (2016) estudian el uso de los relaves secos, junto con una solución de silicato de sodio como activador, para la fabricación de ladrillos geopolímeros. Los resultados cumplieron con los valores establecidos por la *American Society of Testing and Materials* (ASTM) y los requisitos de las normas australianas (AS). Además, presentaron un estudio de viabilidad económica en el que demuestra que el coste es inferior al de los ladrillos comerciales de arcilla. También Shi, Guo y Chen (2011) añadieron entre un 20-30% de relaves de hierro sobre la base de la fórmula de los ladrillos vitrificados, obteniendo ladrillos cuya fase cristalina principal era feldespato de calcio.

**Tabla 4. . Resumen bibliográfico de la utilización de relaves en cerámicas y ladrillos ordenado según año de publicación.**

Revisión	Año	Aplicación	Detalles
Das, Kumar y Ramachandrarao	2000	Pavimentos y revestimientos cerámicos	40% de relaves de mineral de hierro
Oliveira & Holanda	2004	Fabricación de cerámica roja	Incorporación de relaves sólidos a la formulación de la arcilla
Shio, Guo & Chen	2011	Ladrillos vitrificados	Entre un 20-30% de relaves de hierro
Silva et ál.	2014	Fabricación de cerámica roja	Limita a 5% los IOT
Yang et ál.	2014	Producción de ladrillos	50% de relaves con cemento como aglutinante
Kuranchie	2015	Producción de ladrillos	Cumplimiento de los estándares chinos añadiendo cenizas volantes
Yao et ál.	2015	Baldosas vitrocerámicas	Baldosas con propiedades de absorción de microondas a partir de IOT
Kuranchie et ál.	2016	Ladrillos geopolímeros	Relaves secos con una solución de silicato de sodio como activador
Freitas et ál.	2018	Producción de ladrillos	Reutilización de IOT con escorias BOF

Los pavimentos y revestimientos cerámicos son otros de los productos en los que los residuos industriales pueden reutilizarse como materia prima. Podría decirse incluso, que es de las primeras aplicaciones para las que se planteó la reutilización de relaves. Hace casi 20 años, en un estudio realizado por Das, Kumar y Ramachandrarao (2000) ya se exploró la posibilidad



de emplear los IOT como una de las materias primas para estas aplicaciones basándose en la hipótesis de que su alto contenido en sílice mejoraba las prestaciones de los azulejos y baldosas. Oliveira y Holanda (2004) así como Silva et al. (2004) también investigaron sobre la posible utilización de los relaves en la producción de cerámica roja empleada en construcción civil. Incluso se han planteado aplicaciones más innovadoras, como un estudio desarrollado en 2015 por Yao et al. para la preparación de baldosas vitrocerámicas con propiedades de absorción de microondas a partir de IOT como materia prima.

#### **2.4. Otras aplicaciones**

Aunque la mayoría de las investigaciones plantean el uso de los relaves de hierro en el campo de la ingeniería civil y la construcción, es tal el volumen de producción de estos residuos que es necesario encontrar otros sectores en los que sea viable su reutilización. Por ejemplo, se ha comenzado a investigar la posibilidad de recuperación del hierro presente en los relaves en forma de polvo de magnetita (Giri, Das & Pradhan, 2011a). La magnetita se utiliza generalmente en grandes cantidades en la formación de fluidos densos para el aprovechamiento del carbón o como medio de registro magnético en la industria electrónica, aunque su interés más reciente es como base para los ferrofluidos. A pesar de que la magnetita se prepara comúnmente a partir de sales de hierro sintéticas y su elaboración con un material de desecho es bastante difícil, puede resultar muy beneficioso desde un punto de vista comercial y ambiental (Sakthivel, et al., 2010). Giri, Das y Pradhan (2011b) demostraron cómo el polvo de magnetita derivado de los IOT elimina los colorantes orgánicos de las soluciones acuosas y puede aplicarse como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales. Además, caracterizaron el residuo insoluble generado después de la recuperación del hierro: la caolinita, demostrando que, con una superficie razonablemente grande, son eficaces en la eliminación del metileno, alcanzando niveles de adsorción comparables con los obtenidos con caolinita natural.

Otro estudio innovador propone el uso de los relaves de mineral de hierro como pigmento en la producción de pinturas sostenibles para edificios (Galvão et al., 2018). Aunque los relaves empleados se almacenaban en forma de lodo, fue necesario un pre-procesamiento mediante secado para su aplicación. La pintura sostenible presentaba un color rojizo y una opacidad adecuada, con resultados satisfactorios en términos de durabilidad a un coste significativamente inferior. También hay autores que analizaron la conductividad térmica de los materiales de relleno y utilizaron los IOT para intercambiadores de calor subterráneos (Wan et al., 2018). El estudio reveló que los relaves de hierro pueden ser aplicados como un componente de los materiales de relleno térmico para mejorar la conductividad de los sistemas de bomba de calor subterráneos.

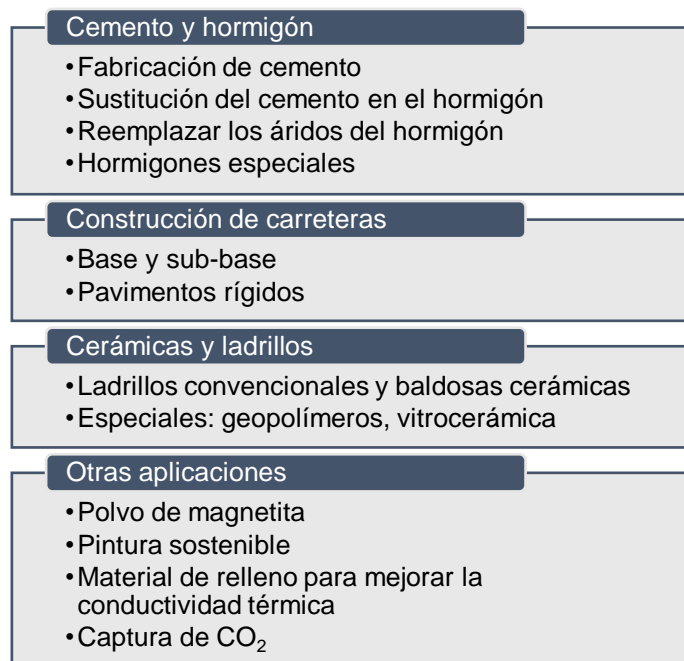
Finalmente, existen investigaciones que proponen la posible mineralización del carbono por parte de algunos residuos de relaves (Nowamooz et al., 2018) La mineralización es un método de secuestro atractivo porque, incluso a bajas temperaturas, almacena el carbono atmosférico dentro de la estructura cristalina de los minerales de forma natural y espontánea, por lo que no requiere costosas tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>. Este secuestro es posible gracias a la presencia de magnesio y calcio en los relaves, que provocan la carbonatación del material, por lo que la cuantificación de las proporciones y composiciones minerales dentro de los residuos mineros es crítica para evaluar su potencial de captura de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, además de su composición, varios estudios han demostrado que la disponibilidad de CO<sub>2</sub> y la saturación de agua en los sitios de reacción son las restricciones más importantes para la mineralización del carbono. Un estudio realizado en 2011 en Quebec mostró cómo una pila de 110 Mt de relaves secos ricos en magnesio lograría una captura estimada de CO<sub>2</sub> de más de 600 t por año (Pronost et al., 2011).

### 3. Conclusiones

Los relaves son un residuo inherente a la industria minera. Concretamente, en la minería de hierro, por cada tonelada de mineral extraído se generan 400 kg de relaves. Dadas las tendencias ambientales actuales, es necesario un cambio radical en la minería hacia acciones más sostenibles. Con ese fin, este informe ha analizado las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de manejo y almacenamiento de los relaves, demostrando cómo los relaves apilados en seco ofrecen la mejor gestión del agua, los menores riesgos de almacenamiento y las mayores posibilidades de una posterior rehabilitación.

Además de los métodos de almacenamiento, se ha realizado una revisión de las principales aplicaciones de los relaves de mineral de hierro, llegando a la conclusión de que la reutilización de los relaves en forma de pasta o lodo es mínima, puesto que la mayoría de las aplicaciones requieren un previo secado para su utilización. La literatura abierta sugiere que los relaves pueden ser convertidos en muchos tipos de cerámica: baldosas, vidrio, etc., así como muchos materiales estructurales y funcionales, como hormigón o bases de carreteras (Figura 2). Sin embargo, aunque la mayoría de las investigaciones se centran en la ingeniería civil, existe también una tendencia creciente a diversificar y buscar aplicaciones en otros campos con enfoques más sostenibles. Estos relaves tienen un gran potencial de reutilización, que reduciría la necesidad de extracción de materias primas, lo que no solo llevaría implícito un beneficio medioambiental, sino importantes ahorros económicos.

**Figura 2. Principales aplicaciones de los relaves de mineral de hierro.**



### 4. Referencias

- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S. & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108.
- Aristimunho, P. B., & Bertocini, S. R. (2012). Application of iron ore mud in powder form in portland cement presence. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5 (2), 153-165.

- Australian Government (2016). *Tailings Management. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry*. Australia's Department of Industry, Innovation and Science.
- Carneiro, A., & Fourie, A. B. (2018). A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia, presentado en *21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Perth.
- de Castro, L. A., Silva, G. C., Mendes, J. C., & Fiorotti, R. A. (2016). Using iron ore tailings from tailing dams as road material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (10).
- Das, S., Kumar, S., & Ramachandrarao, P., (2000). Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. *Waste Management*, 20, 725-729.
- Dauce, P. D, de Castro, G. B., Lima, M. M. F., Lima, R. M. F. (2018). Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. *Journal of Materials Research and Technology*,
- Davis, M. (2011). Filtered Dry Stacked Tailings. The Fundamentals, presentado en *Proceedings Tailings and Mine Waste*, Vancouver, BC.
- Deloitte (2018). *Tracking the trends 2018. The top 10 issues shaping mining in the year ahead*. Obtenido el 20 de noviembre de 2018 de Deloitte: <https://www2.deloitte.com/tr/en/pages/energy-and-resources/articles/tracking-the-trends-2018.html>
- Deloitte (2019). *Tracking the trends 2019. The top 10 issues shaping mining in the year ahead*. Obtenido el 10 de febrero de 2019 de Deloitte: <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/energy-and-resources/articles/tracking-the-trends.html>
- Earthworks and MiningWatch Canada (2012). Troubled waters: how mine waste dumping is poisoning our oceans, rivers, and lakes.
- Fernandes, L., de Souza, I., dos Santos, L. F., & Sávio, D. (2018). Iron ore tailings as addition to partial replacement of Portland cement. *Materials Science Forum*, 930, 125-130.
- Freitas, S., Sousa, L. N., Diniz, P., Martins, M. E., & Assis, P. S., (2018). Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick. *Clean Techn Environ Policy*, 20 (5), 1087-1095.
- Galvão, J. L. B., Andrade, H. D., Brigolini, G. J., Peixoto, R. A. F., & Mendes, J. C. (2018). Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. *Journal of Cleaner Production*, 200, 412-422.
- Giri, S. K., Das, N. N., & Pradhan, G. C. (2011a). Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles using waste iron ore tailings for adsorptive removal of dyes from aqueous solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 389 (1), 43-49.
- Giri, S. K., Das, N. N., & Pradhan, G. C. (2011b). Magnetite powder and kaolinite derived from waste iron ore tailings for environmental applications. *Powder Technology*, 214 (3), 513-518.
- Goldcorp (2017, 29 marzo). *Goldcorp's EcoTails Technology Challenges Mining's Historical Relationship with H2O*. Publicado en: <https://blog.goldcorp.com/2017/03/29/goldcorps-ecotails-technology-challenges-minings-historical-relationship-with-h2o/>
- Huang, X., Ranade, R., & C. Li, V. (2013). Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as cement replacement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (7), 923-931.

- Jakubick, A., McKenna, G. (2003). Stabilisation of tailings deposits: international experience. *Mining and the Environment III*, Canada, 1-9.
- Klohn Crippen Berger (2017). *Study of Tailings Management Technologies* (MEND Report 2.50.1). Obtenido el 25 de noviembre de 2018 de Mine Environment Neutral Drainage: <http://mend-nedem.org/mend-report/study-of-tailings-management-technologies-2017/>
- Kuranchie, F. A. (2015). Characterisation and applications of ore tailings in building and constructions projects. (Doctorates and Masters, Edtih Cowan University).
- Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., Habibi, D., & Mohyeddin, A. (2015). Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Engineering*, 2 (1).
- Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., Habibi, D., & Mohyeddin, A. (2016). Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30 (2), 92-114.
- Li, B., Zhao, Z., Tang, B., Li, H., Cheng, H., & Ma, Z. (2018). Comprehensive utilization of iron tailings in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (199). IOP Publishing Ltd. DOI: 10.1088/1755-1315/199/4/042055.
- Li, C., Sun, H., Yi, Z., & Li, L. (2010). Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material. *Journal of Hazardous Materials*, 174, 78-83.
- Longsheng, Y., Hang, L., Lina, Q., & Qirong, L. (2015). Research progress and application prospect of iron tailings for pavement base material. *Mining Research and Development*, 10.
- Lv, X., Shen, W., Wang, L., Dong, Y., Zhang, J., & Xie, Z. (2019). A comparative study on the practical utilization of iron tailings as a complete replacement of normal aggregates in dam concrete with different gradation, *Journal of Cleaner Production*, 211, 704-715.
- Ma, B., Cai, L., Li, X., & Jian, S. (2016). Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products. *Journal of Cleaner Production*, 127, 162-171.
- Nowamooz, A., Dupuis, J. C., Beaudoin, G., Molson, J., Lemieux, J. M., Horswill, M., Fortier, R., Larachi, F., Maldague, X., Constantin, M., Duchesne, J., & Therrien, R. (2018). Atmospheric carbon mineralization in an industrial-scale chrysotile mining waste pile. *Environ. Sci. Technol.*, 52 (14), 8050-8057.
- Oliveira, G. E., & Holanda, J. N. F. (2004). Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 50 (314), 75-80.
- Panditharadhya, B. J., & Ravi Shankar, A. U. (2017). A Study on utilization of iron ore tailings as partial replacement for fine aggregates in the construction of rigid pavements. *National Conference on Roads and Transport (NCORT - 2017)*. Presentado en el encuentro de Indian Institute of Technology, Roorkee, India.
- Pronost, J., Beaudoin, G., Tremblay, J., Larachi, F., Duchesne, J., Hébert, R., & Constantin, M. (2011). Carbon sequestration kinetic and storage capacity of ultramafic mining waste», *Environmental Science and Technology*, 45 (21), 9413-9420.
- Ramachandran, V. R. (2018). Water: An increasingly valuable and challenging resource for the mining and metallurgical industry to manage effectively, en Davis B. et al. (eds.) *Extraction 2018. The Minerals, Metals & Materials Series* (pp. 1397-1409). Springer, Cham.

- Sakthivel, R., Vasumathi, N., Sahu, D., & Mishra, B. K. (2010). Synthesis of magnetite powder from iron ore tailings. *Powder Technology*, 201 (2), 187-190.
- Shettima, A. U., Hussin, M. W., Ahmad, Y., & Mirza, J. (2016). Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 120, 72-79.
- Shi, Q., Guo, Y. & Chen, J., (2011). Application of Chengchao iron tailings in glass bricks. *Chinese Ceramics*, 47 (9), 41-44.
- da Silva, F. L., Araújo, F. G. S., Teixeira, M. P., Gomes, R. C., & von Krüger, F. L. (2014). Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. *Ceramics International*, 40 (10), Part B, 16085-16089.
- Soliman, T., Fletcher, L., & Crocker, T. (2017). *Digging deep*. Obtenido el 25 de noviembre de 2018, de CDP, Disclosure Insight Action.
- Sun, J. S., Chen, Z. X., Xiao, T., & Jin, C. Z. (2012). Research on the performances of lime fly ash stabilized iron tailing gravel in highway application. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*, 34 (3), 59-62.
- Sun, J. S. Dou, Y. M., Chen, Z. X., & Yang, C. F. (2011). Experimental study on the performances of cement stabilized iron ore tailing gravel in highway application. *Applied Mechanics and Materials*, 97-98, 425-428.
- Uchechukwu, E. A., & Ezekiel, M. J. (2014). Evaluation of the iron ore tailings from Itakpe in Nigeria as concrete material. *Advances in Materials*, 3 (4), 27-32.
- Williams, D. (2017, julio), Future Tailings Management, *4th International Seminar on Tailings*, presentado en el encuentro de la organización Association of British Mining Equipment Companies, Santiago de Chile.
- Wan, R., Kong, D., Kang, J., Yin, T., Ning, J., & Ma, J. (2018). The experimental study on thermal conductivity of backfill material of ground source heat pump based on iron tailings. *Energy and Buildings*, 174, 1-12.
- Yang, C., Cui, C., Qin, J., & Cui, X. (2014). Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings. *Construction and Building Materials*, 70, 36-42.
- Yao, R., Liao, S., Dai, C., Liu, Y., Chen, X., & Zheng, F. (2015). Preparation and characterization of novel glass–ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 378, 367-375.
- Zhang, T., Wang, L., & Yan, Z. (2018). The environmental study on utilization of casting waste sand and iron tailing sand as road base materials. *Foundation Environmental Protection & Research*, 27 (106), 1615-1624.
- Zhao, S., Fan, J., & Sun, W. (2014). Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 540-548.