MEJORES PRÁCTICAS DE GESTIÓN PARA EL RECICLAJE DE RESIDUOS DE YESO DESDE DE LA DECONSTRUCCIÓN HASTA LA FABRICACIÓN

**3 de enero de 2023**

Elaborado para:

The Construction and Demolition Recycling Association (CDRA)

Comité de Reciclaje de Yeso

Elaborado por:

Dr. Timothy G. Townsend, investigador principal

Sean Plechy, asistente de investigación de pregrado

University of Florida

Laboratorio de investigación para la gestión de materiales sostenibles

Departamento de Ciencias de Ingeniería Ambiental

Escuela de Ingeniería de Infraestructura Sostenible y Medioambiente

Icon

Description automatically generated with medium confidence

**Resumen ejecutivo**

|  |  |
| --- | --- |
| Los residuos de construcción y demolición (C y D) son uno de los mayores flujos de residuos en Estados Unidos y se estima que, en 2018, alcanzaron los 600 millones de toneladas. Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), los paneles de yeso representan el 2.4 % del total de residuos de C y D generados anualmente. Los datos más recientes revelan una tasa de reciclaje de yeso del 17 % por año. La mayor parte del material se envía al vertedero, dando lugar a la formación de gas de sulfuro de hidrógeno, el cual genera problemas de olores y podría resultar perjudicial para la salud. Actualmente existen varios mercados para reciclar los residuos de yeso; los tres que se consideran en esta especificación son la producción de paneles de yeso nuevos, la agricultura y la producción de cemento. A la larga, el reciclaje de residuos de yeso ahorra espacio en los vertederos, reduce los olores desagradables y ahorra energía. Es así que la Asociación de Reciclaje de Construcción y Demolición (CDRA) ha desarrollado una especificación estándar para proporcionar a los equipos de deconstrucción, recicladores y fabricantes una guía para producir yeso reciclado de la mejor calidad posible por mercado final ([www.cdrecycling.org](http://www.cdrecycling.org)). |  |

|  |  |
| --- | --- |
|  | La fuente de los desechos de paneles de yeso influye en el nivel de procesamiento necesario y el producto final de yeso reciclado. Por consiguiente, no se puede dejar de recalcar la importancia de las prácticas de deconstrucción. Las prácticas adecuadas de deconstrucción influyen en la calidad y rentabilidad del yeso reciclado y dependen del diálogo activo entre los equipos de deconstrucción y los recicladores con el fin de garantizar que se alcance la calidad deseada. Después de que el reciclador evalúa y acepta los residuos de yeso en función de sus propios estándares internos, lo cual se puede informar mediante los criterios recomendados en la especificación, se dispone de varios métodos y tecnologías para procesar los residuos de yeso. Algunos factores dependerán de la especificación del producto deseado y el mercado objetivo. Durante el procesamiento, los desechos de paneles de yeso se reducen a polvo y el papel se separa del yeso. Se debe someter a ensayo las propiedades físicas y químicas del yeso reciclado para garantizar que el producto cumpla con las especificaciones de diversos mercados y aplicaciones. Las concentraciones químicas se pueden comparar con los límites de riesgo regulatorios o con las normas de aplicación sobre el terreno para garantizar la seguridad de la reutilización del producto. Estos criterios variarán según el mercado final y deben constituir un punto de comunicación entre el reciclador y el fabricante. La especificación también indica que podría ser mejor utilizar yeso reciclado que yeso natural en la producción de paneles de yeso y en la fabricación de cemento. Desde la perspectiva de una enmienda agrícola, el yeso reciclado se puede aplicar directamente sobre la tierra siempre que cumpla con los criterios necesarios. La especificación estándar creada por la CDRA incluye toda esta información, así como otros detalles. |

**Índice**

[1. Introducción 1](#_Toc131574568)

[1.1. Yeso 1](#_Toc131574569)

[1.1.1. Yeso reciclado (YR) 1](#_Toc131574570)

[1.1.1.1. Reciclaje de ciclo abierto 1](#_Toc131574571)

[1.1.1.2. Reciclaje de ciclo cerrado 1](#_Toc131574572)

[1.2. Fuentes de residuos de yeso 1](#_Toc131574573)

[1.2.1. Demolición 1](#_Toc131574574)

[1.2.1.1. Demolición frente a deconstrucción 2](#_Toc131574575)

[1.2.2. Construcción nueva 2](#_Toc131574576)

[1.2.3. Fabricación 2](#_Toc131574577)

[1.3. Problemas actuales de eliminación 2](#_Toc131574578)

[2. Deconstrucción 3](#_Toc131574579)

[2.1. Preparación 3](#_Toc131574580)

[2.1.1. Coordinación 3](#_Toc131574581)

[2.1.2. Auditoría de residuos 3](#_Toc131574582)

[2.1.2.1. Recomendaciones generales para una auditoría de residuos 3](#_Toc131574583)

[2.1.2.2. Materiales que contienen plomo 4](#_Toc131574584)

[2.1.3. Asbesto 4](#_Toc131574585)

[2.1.4. Metodología de la auditoría 5](#_Toc131574586)

[2.1.4.1. Informe detallado 5](#_Toc131574587)

[2.1.5. Plan de gestión de residuos de la obra (SWMP) 5](#_Toc131574588)

[2.1.5.1. Planificación eficaz de un plan de captación de residuos de yeso 6](#_Toc131574589)

[2.1.5.2. Contenedores y traslados de ida y vuelta 6](#_Toc131574590)

[2.1.6. Asignación de trabajadores 6](#_Toc131574591)

[2.1.6.1. Capacitación de trabajadores 6](#_Toc131574592)

[2.2. Ejecución 6](#_Toc131574593)

[2.2.1. Designación de trabajadores 7](#_Toc131574594)

[2.2.2. Segregación *in situ* 7](#_Toc131574595)

[2.2.3. Herramientas y maquinaria 7](#_Toc131574596)

[2.2.4. Técnicas de deconstrucción por sistema de residuos de yeso 8](#_Toc131574597)

[2.2.4.1. Técnicas de deconstrucción para sistemas fijados a un marco 8](#_Toc131574598)

[2.2.4.2. Técnicas de deconstrucción para paneles de cielorraso en una rejilla de techo 9](#_Toc131574599)

[3. Reciclaje 10](#_Toc131574600)

[3.1. Ubicación 10](#_Toc131574601)

[3.2. Sistema de gestión de calidad (SGC) 10](#_Toc131574602)

[3.2.1. Criterios de admisión de residuos (WAC) 11](#_Toc131574603)

[3.2.2. Impurezas y sus efectos en el reciclaje 12](#_Toc131574604)

[3.2.2.1. Contenido de humedad 12](#_Toc131574605)

[3.2.2.2. Plásticos, laminados, piedras y materiales de aislamiento 13](#_Toc131574606)

[3.2.2.3. Presencia accidental de metales 13](#_Toc131574607)

[3.2.2.4. Madera 13](#_Toc131574608)

[3.2.2.5. Anhidrita 13](#_Toc131574609)

[3.2.3. Recepción de residuos 13](#_Toc131574610)

[3.2.3.1. Organización del suministro de materiales de desecho 13](#_Toc131574611)

[3.2.3.2. Punto de origen 14](#_Toc131574612)

[3.2.3.3. Información proporcionada por el procesador 14](#_Toc131574613)

[3.2.3.4. Información proporcionada por el proveedor/generador de residuos 14](#_Toc131574614)

[3.2.3.5. Peso 14](#_Toc131574615)

[3.2.3.6. Inspección/tamizaje 14](#_Toc131574616)

[3.2.3.7. Clasificación 15](#_Toc131574617)

[3.2.3.8. Almacenamiento y apilamiento 15](#_Toc131574618)

[3.2.4. Procesamiento de residuos de yeso 16](#_Toc131574619)

[3.2.4.1. Preprocesamiento de residuos de yeso 17](#_Toc131574620)

[3.2.4.2. Reducción de tamaño 17](#_Toc131574621)

[3.2.4.3. Tamizaje de residuos de yeso 17](#_Toc131574622)

[3.2.4.4. Granulometría 18](#_Toc131574623)

[3.2.4.5. Generación de polvo 18](#_Toc131574624)

[3.2.5. Eliminación y reciclaje de papel residual 19](#_Toc131574625)

[3.2.5.1. Contaminantes preocupantes 19](#_Toc131574626)

[3.2.6. Control de calidad 21](#_Toc131574627)

[3.2.6.1. Procedimiento de muestreo y ensayo 21](#_Toc131574628)

[3.2.6.2. Muestreo representativo 21](#_Toc131574629)

[3.2.6.3. Frecuencia de análisis 21](#_Toc131574630)

[3.2.7. Manipulación, embalaje y transporte de materiales 22](#_Toc131574631)

[3.2.7.1. Embalaje del producto 22](#_Toc131574632)

[3.2.7.2. Transporte del producto 23](#_Toc131574633)

[3.3. Requisitos de calidad del YR 23](#_Toc131574634)

[3.3.1. Ciclo cerrado y requisitos generales 23](#_Toc131574635)

[3.3.1.2. Requisitos legales para el uso en los paneles de yeso 23](#_Toc131574636)

[3.3.1.3. Recomendaciones para el reciclaje de ciclo cerrado y uso general 24](#_Toc131574637)

[3.3.1.4. Granulometría 25](#_Toc131574638)

[3.3.1.5. Humedad libre 26](#_Toc131574639)

[3.3.1.6. Pureza 26](#_Toc131574640)

[3.3.1.7. Contenido de papel y fibra residual (TOC) 26](#_Toc131574641)

[3.3.1.8. Sales solubles en agua 27](#_Toc131574642)

[3.3.1.9. Contenido de silicona 27](#_Toc131574643)

[3.3.1.10. Otras impurezas 27](#_Toc131574644)

[3.3.1.11. pH de la materia prima 28](#_Toc131574645)

[3.3.2 Requisitos para el uso agrícola 28](#_Toc131574646)

[3.3.2.1. Procesamiento específico para el uso agrícola 28](#_Toc131574647)

[3.3.2.2. Requisitos legales para el uso agrícola 28](#_Toc131574648)

[3.3.2.3. Recomendaciones específicas para el uso agrícola 28](#_Toc131574649)

[3.3.3. Requisitos para el uso en clínker de cemento 29](#_Toc131574650)

[3.3.3.1. Requisitos legales para el uso en clínker de cemento 29](#_Toc131574651)

[3.3.3.2. Recomendaciones específicas para el clínker de cemento 29](#_Toc131574652)

[4. Fabricación 30](#_Toc131574653)

[4.1. Consideraciones de fabricación para la producción de paneles de yeso 30](#_Toc131574654)

[4.1.1. Almacenamiento de YR 30](#_Toc131574655)

[4.1.2. Alimentación de materia prima 31](#_Toc131574656)

[4.1.3. Ajustes en el procesamiento 31](#_Toc131574657)

[4.1.3.1 Equipos e infraestructura 31](#_Toc131574658)

[4.1.4. Tiempo de fraguado 31](#_Toc131574659)

[4.2. Consideraciones de fabricación para la producción de paneles de yeso 32](#_Toc131574660)

[4.2.1. Ensayos de producción 32](#_Toc131574661)

[4.2.1.1. Limitaciones en la incorporación de YR 32](#_Toc131574662)

[4.2.1.2. Maximización del YR 32](#_Toc131574663)

[4.2.1.3. Modificaciones del equipo 33](#_Toc131574664)

[4.2.1.4. Problemas de reincorporación con escayola 33](#_Toc131574665)

[4.2.1.5. Problemas de reincorporación con paneles de yeso 33](#_Toc131574666)

[4.2.1.6. Limitaciones y consideraciones 33](#_Toc131574667)

[4.3. Consideraciones de fabricación para el uso en clínker de cemento 34](#_Toc131574668)

[4.3.1 Estudio de referencia 34](#_Toc131574669)

[5. Conclusión 37](#_Toc131574670)

**Nota importante**

En la literatura actual hace falta información específica con respecto a las prácticas óptimas de gestión para la deconstrucción, el procesamiento y la fabricación de residuos de yeso por cada mercado final. Por lo tanto, las variaciones o adiciones para la deconstrucción y procesamiento pueden ser aceptables o necesarias en el contexto de los distintos mercados finales. Este informe (a menos que se especifique lo contrario) se basa fundamentalmente en fuentes que consideran, sobre todo, las prácticas óptimas de gestión de residuos de yeso que promueven el reciclaje en ciclo cerrado y la producción de yeso reciclado de alta calidad.

# 1. Introducción

## 1.1. Yeso

Generalmente, los paneles de yeso se utilizan en el sector de la construcción debido a sus propiedades favorables como la incombustibilidad, la rentabilidad, la regulación del sonido y el aislamiento. Es uno de los pocos materiales que, en teoría, se puede reciclar indefinidamente; sin embargo, la mayor parte de los residuos de yeso terminan en vertederos de construcción y demolición. Este informe intentará generar una guía de reciclaje de yeso en función de las mejores prácticas de gestión definidas en fuentes de literatura como el proyecto Gypsum-to-Gypsum (GtoG) y PAS 109 [1], [2]. Estas prácticas abarcarán desde la deconstrucción del yeso como material residual procedente de actividades de construcciones nuevas y demoliciones, hasta la fabricación de productos de yeso nuevos en un contexto de ciclo cerrado y de ciclo abierto.

### 

### 1.1.1. Yeso reciclado (YR)

El YR se crea a partir de los residuos de yeso generados mediante los procesos de fabricación y las actividades de construcción, demolición, deconstrucción y renovación. A efectos de este informe, el YR se utiliza para referirse al yeso que resulta del procesamiento controlado de residuos de yeso para separar el yeso, el revestimiento de papel y otros contaminantes. El YR suele tener la formar de un polvo fino o material de tipo conglomerado pequeño.

##### 

#### 1.1.1.1. Reciclaje de ciclo abierto

El reciclaje de ciclo abierto es un proceso de reciclaje que convierte los productos fabricados en un material útil que se puede utilizar para nuevas aplicaciones o en productos nuevos. Algunos ejemplos en este contexto del YR son su uso como enmienda agrícola y como retardador de fraguado en el clínker de cemento.

##### 

#### 1.1.1.2. Reciclaje de ciclo cerrado

El reciclaje de ciclo cerrado es un proceso de reciclaje a través del cual un producto fabricado se vuelve a reciclar, tras su eliminación, en el mismo producto fabricado o en un producto similar sin una degradación o un desperdicio significativos.

## 1.2. Fuentes de residuos de yeso

### 

### 1.2.1. Demolición

Los sitios de demolición son la mayor fuente de residuos de yeso; sin embargo, no todos los recicladores aceptan los paneles de yeso de demoliciones, ya que contienen revestimientos de paredes y contaminantes [3]. Estos contaminantes podrían limitar la funcionalidad de los residuos de yeso en su mercado final objetivo, hacer que el costo del reciclaje de residuos de yeso sea exorbitante u ocasionar problemas desde un punto de vista toxicológico y medioambiental.

#### 1.2.1.1. Demolición frente a deconstrucción

La demolición tiene como su más alta prioridad la destrucción de una estructura y genera pilas de materiales no homogéneos. La reciclabilidad y el valor económico de estos materiales se ven afectados cuando la demolición es el principal método de destrucción o renovación de la edificación.

Por otro lado, la deconstrucción sirve para aumentar la reciclabilidad de las materias primas. La deconstrucción genera numerosas pilas de materiales de construcción homogéneos con daños mínimos debido al tiempo suficiente y al cuidado prestados en su recuperación y clasificación, a la vez que cumple con el objetivo final.

### 

### 1.2.2. Construcción nueva

La construcción nueva es la siguiente mayor fuente de residuos de yeso. Este material incluye los paneles de yeso y el material de estiba no utilizados de obras de construcción de edificaciones. Este material tendrá pocos o ningún contaminante, ya que no se ha utilizado en una edificación y se sabe de dónde procede.

### 

### 1.2.3. Fabricación

Los residuos que genera la fabricación de yeso son una fuente pequeña de residuos de yeso. Estos residuos son cualquier material rechazado durante la fabricación de productos de yeso. Este material suele reutilizarse *in situ* en la planta de fabricación.

## 1.3. Problemas actuales de eliminación

La eliminación de desechos de paneles de yeso procedentes de la demolición y las construcciones nuevas mediante los métodos de gestión de residuos puede causar problemas derivados de la composición química del yeso. Cuando el yeso se coloca en un entorno anaeróbico húmedo, como un vertedero, se producen emisiones de gas de sulfuro de hidrógeno. El gas de sulfuro de hidrógeno (H2S) puede ser tóxico en altas concentraciones (de 500 a 1000 ppm), aunque el principal problema en muchos emplazamientos es el olor desagradable [4]. Los desechos de paneles de yeso reciclados en una planta de reciclaje mixta de C y D suelen reducirse de tamaño y se acumulan en los finos o restos de los C y D. El contenido de yeso en los finos de C y D puede variar entre el 1 % y más del 25 % de todo el material [5]. Esto llevó a algunos estados a desarrollar criterios y guías de reutilización que requieren que las plantas de procesamiento de C y D tomen muestras de finos y los analicen antes de su reaprovechamiento [3]. Aunque la producción de H2S es el mayor problema con respecto a la eliminación, también puede existir riesgo de lixiviación de sulfatos de finos de C y D y posteriores excedencias de concentraciones admisibles de sulfato en el suelo o el agua [6]. Otra sustancia química asociada a los desechos de paneles de yeso es el boro [7]. Se han observado concentraciones de boro en las inmediaciones de los vertederos de C y D, que podrían ser preocupantes [7]. Si bien en este documento no se aborda la seguridad de los trabajadores, esta siempre debe ser la máxima prioridad. Se recomienda que cualquier operación de procesamiento cuente con un manual de seguridad específico para las funciones diarias que se realizan y es necesario consultar a la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) de Estados Unidos para recibir orientación.

# 2. Deconstrucción

Esta sección del documento abarca todas las prácticas de deconstrucción que van desde la consideración y selección de una obra que será deconstruida, hasta el transporte de residuos de yeso a los recicladores para su procesamiento.

## 

## 2.1. Preparación

Se deben aplicar todas las siguientes prácticas antes de que ocurran las actividades de deconstrucción o demolición *in situ*.

### 

### 2.1.1. Coordinación

La falta de coordinación es un problema significativo entre los agentes del sector de la construcción [8]. En consecuencia, se deben priorizar las reuniones periódicas para identificar los problemas específicos de la obra, analizar los procedimientos y cronogramas, y coordinar los requisitos de las operaciones de recuperación específicas al considerar la adquisición de residuos de yeso de una nueva obra de demolición/deconstrucción.

### 

### 2.1.2. Auditoría de residuos

La aplicación de una auditoría de residuos efectiva antes de la deconstrucción, aunque no siempre es obligatoria, es una parte importante de cualquier operación de deconstrucción. Permite al jefe de proyecto presentar directrices relevantes y adaptadas para la gestión de residuos a las empresas de deconstrucción.

Asimismo, ayuda en la planificación, reduce los posibles riesgos para los trabajadores y permite proyectar estimaciones en función de la economía en mercados específicos.

##### 

#### 2.1.2.1. Recomendaciones generales para una auditoría de residuos

Se recomienda realizar la auditoría antes de efectuar una inversión en herramientas, trabajadores u otros materiales o servicios relevantes.

Una auditoría de residuos confiable empieza con una inspección visual llevada a cabo por la persona/entidad/responsable a cargo de la auditoría. El objetivo inicial es identificar diferentes sistemas (panel de yeso fijado a un bastidor de madera con aislamiento, paneles de yeso para cielorraso en una rejilla de techo, panel de yeso adherido a un marco de metal, etc.) y materiales constitutivos. Esta visita también tiene por objetivo recopilar datos relacionados con fracciones de residuos, cantidades, ubicaciones, tasas de recuperación, potencial de reciclaje y la presencia de materiales peligrosos. Se recomienda incluir fotos en el informe de auditoría para facilitar la comprensión. Asimismo, se debe aplicar el uso de técnicas destructivas (por ejemplo, romper una capa de panel de yeso para identificar el tipo de aislamiento) cuando sea posible.

Esto ayuda a evitar las imprecisiones en el tipo y la cantidad de materiales. Sin embargo, a veces esto no se puede hacer, como p. ej. cuando la edificación todavía está ocupada.

#### 2.1.2.2. Materiales que contienen plomo

En Estados Unidos no hay requisitos específicos en el Código de Reglamentos Federales (CFR), que exijan la reducción de plomo en los residuos de C y D. Asimismo, es difícil que los residuos de C y D no pasen satisfactoriamente el método de prueba de la EPA para detectar las características de los residuos peligrosos, método de ensayo 1311: Procedimiento de lixiviación para la caracterización de la toxicidad (TCLP) del SW-846, para la lixiviación de plomo en relación con la gran cantidad de materiales inertes y las cantidades relativamente pequeñas de plomo que pueden estar presentes.

Por lo tanto, es poco probable que los residuos de C y D se puedan clasificar como residuos peligrosos y deban ser eliminados en un vertedero de residuos peligrosos regulado por el subtítulo C. En consecuencia, es probable que el método más rentable sea sencillamente tratar los residuos de yeso que están contaminados con plomo como residuos de demolición ordinarios que se eliminarán en un vertedero de C y D. Si se busca una reducción, las personas y empresas deben seguir los procedimientos de reducción de plomo regulados por el Gobierno federal, que se encuentran en la Parte 745, Título 40, 2021 [9] del *Código de Reglamentos Federales*.

De igual forma, Canadá no cuenta con un requisito federal para la eliminación de pintura a base de plomo. Sin embargo, la siguiente guía describe sus recomendaciones para la eliminación de pintura a base de plomo [10].

### 2.1.3. Asbesto

Antes de ejecutar la auditoría de residuos, se debe llevar a cabo el procedimiento correspondiente para el asbesto. En Estados Unidos, la Parte 61, Título 40, 1990 [11] del *Código de Reglamentos Federales* de Estados Unidos describe el procedimiento para identificar y eliminar el asbesto antes de la demolición o renovación de una edificación. Las construcciones contempladas en este reglamento son cualquier estructura, instalación o edificación institucional, comercial, pública, industrial o residencial. Se excluyen las edificaciones residenciales con cuatro o menos unidades de vivienda. Antes de la demolición de una edificación, se necesita la aprobación de la agencia estatal correspondiente, incluida una inspección posterior para determinar si hay asbesto y, de ser así, en qué cantidad [12]. Si la cantidad de asbesto friable es superior al 1 %, se deberá cumplir con los requisitos de control de emisiones. Los materiales reglamentados que contienen asbesto (RACM) deben eliminarse según los reglamentos estipulados en el Título 40, Parte 61, Subparte M del CFR.

La política federal canadiense describe su propio procedimiento en el *Reglamento Canadiense de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, cuyas secciones del 10.26.1 al 10.26.11 describen el proceso para la identificación, la remoción, la descontaminación, el muestreo y la eliminación de materiales que contienen asbesto, así como las ubicaciones en las que se encuentran [13].

Se debe informar a los trabajadores acerca de la posibilidad de que haya asbesto en los residuos de yeso anteriores a 1990. La mayor parte del asbesto se encuentra en materiales que se utilizan en las planchas de yeso, como compuesto para juntas, cinta para yeso, etc… El principal problema con el asbesto son las partículas que quedan suspendidas en el aire debido a la manipulación de los paneles de yeso durante las actividades de deconstrucción. La capacitación en seguridad y los exhaustivos procedimientos de tamizaje son herramientas eficaces para mantener la seguridad del trabajador cuando se aplica una auditoría de residuos y se procesan paneles de yeso en operaciones de reciclaje.

### 2.1.4. Metodología de la auditoría

La metodología de la auditoría se puede dividir en las distintas fases que se indican a continuación [14].

* Recopilación de documentos disponibles asociados al proyecto, incluidas las evaluaciones de asbesto y plomo.
* Inspección visual del sitio.
* Inventario de las distintas estructuras y materiales identificados en cada una de ellas.
* Recomendaciones para procedimientos con conciencia de seguridad durante las tareas de deconstrucción y gestión de residuos.
* Cantidad estimada de cada material.
* Investigación de mercados locales para definir los puntos de destino de preferencia y alternos para cada flujo de residuo.
* Cálculo de las tasas de recuperación y eliminación.

#### 2.1.4.1. Informe detallado

Se recomienda crear un inventario de los materiales o sistemas encontrados en cada edificación y en cada planta de la edificación, incluidos los receptáculos potenciales y recomendados en los que podrían verterse los residuos y las medidas de prevención necesarias que se deben tomar durante la deconstrucción. A continuación se indica un enlace a un ejemplo de cómo se podría ver esa tabla (se puede modificar para que sea específica para paneles de yeso) marcador de posición para hipervínculo.

### 2.1.5. Plan de gestión de residuos de la obra (SWMP)

Se debe poner en práctica un SWMP que incluya descripciones detalladas de estrategias de gestión de residuos y control de residuos aplicadas a cada flujo de residuos en todas las etapas de construcción, deconstrucción o renovación. Esto se hace para maximizar las tasas de recuperación y gestionar correctamente los posibles peligros. Otro tipo de información más específica que debe contener un SWMP incluye, entre otros aspectos: planes para la reutilización y recuperación de los residuos previstos, especificando transportistas de residuos, destinos y medidas de recuperación. El SWMP es un documento en evolución que se debe actualizar durante el curso del proyecto para reflejar la gestión real de los tipos de residuos identificados, así como de los materiales, acontecimientos y cambios operativos imprevisibles que vayan registrándose.

#### 2.1.5.1. Planificación eficaz de un plan de captación de residuos de yeso

La planificación eficaz y la implementación de un plan de captación de residuos de yeso que se adaptan a las características de las obras de construcción facilitan el traslado de materiales desde la obra de deconstrucción hasta contenedores con ruedas u otras unidades de contención. Estos sistemas deben diseñarse para limitar la manipulación manual del yeso, reducir la contaminación y optimizar las eficiencias operativas. Otra buena práctica es colocar los contenedores junto a la huella de la edificación y llenar los residuos directamente en los contenedores, en lugar de primero apilarlos.

##### 

#### 2.1.5.2. Contenedores y traslados de ida y vuelta

Otra parte del SWMP debe incluir un estimado de la cantidad, el tamaño y el tipo de contenedores que se necesitan. Lo ideal es utilizar contenedores con ruedas cubiertos para limitar el posible ingreso de humedad e impurezas. La cantidad y el tamaño de contenedores deben definirse en función del volumen estimado de residuos calculado en la auditoría de residuos. Se debe planificar la frecuencia de recolección de residuos junto con las especificaciones del contenedor para asegurar que solo se transporten las cargas de contenedor completo y se evite el llenado excesivo. Estas prácticas ayudan a obtener un ahorro económico, medioambiental y de tiempo, ya que se optimizan el almacenamiento de residuos de yeso y los traslados de ida y vuelta hacia su destino final.

### 2.1.6. Asignación de trabajadores

El mejor método para asegurarse de que se cumpla el plan de gestión de residuos es designar a por lo menos una persona responsable de la supervisión de las operaciones de gestión de residuos y la inspección habitual de las áreas de almacenamiento [15]. Se debe revisar periódicamente que se utilicen contenedores con ruedas para residuos de yeso. Esto incluye, entre otros, cubrir los contenedores de residuos con ruedas al finalizar la jornada con el fin de reducir el posible ingreso de humedad e impurezas.

##### 

#### 2.1.6.1. Capacitación de trabajadores

Los trabajadores deben estar capacitados específicamente en prácticas relacionadas con el desmantelamiento de productos de yeso, así como con la clasificación y el almacenamiento de residuos de yeso. Los métodos de deconstrucción son más laboriosos en comparación con la demolición. Sin embargo, las técnicas de deconstrucción son fáciles de aprender con una capacitación periódica [15].

## 2.2. Ejecución

Se debe cumplir con las siguientes prácticas a medida que se produzcan las actividades de deconstrucción y demolición. Según la norma ASTM C1264, en cada producto o paquete de panel de yeso deberá estar claramente marcado lo siguiente: el espesor, el nombre del fabricante o proveedor, la marca, de ser el caso, y la especificación ASTM para el producto [16]. Es posible que las placas que no cuenten con estas marcas contengan plomo y asbesto, así como otros contaminantes, y no deben aceptarse.

### 2.2.1. Designación de trabajadores

Se debe designar a los trabajadores capacitados para que lleven a cabo la deconstrucción de productos de yeso. Se ha determinado que los trabajadores dedicados a las operaciones de clasificación favorecen las operaciones de reciclaje, ya que producen materiales reciclables de mayor calidad con mayor rapidez [15].

### 2.2.2. Segregación *in situ*

La segregación *in situ* se refiere al proceso de clasificar residuos de yeso adecuados para su reciclaje en la fuente. Es mucho más probable que ocurra una recuperación de alta calidad si se lleva a cabo una segregación en la fuente [15]. Si el material se traslada a una estación de transferencia sin ser segregado, se reduce considerablemente la probabilidad de que cumpla con los criterios de admisión de residuos (WAC) de la planta de reciclaje debido a la contaminación que se produce al mezclar los materiales. Asimismo, la presencia de yeso en el flujo de residuos puede contaminar otros productos reciclables.

### 2.2.3. Herramientas y maquinaria

Es probable que los procesos exactos de deconstrucción varíen entre empresas. Hay algunas herramientas y máquinas que se utilizan habitualmente. Las herramientas manuales se utilizan para apalancar, desatornillar y cortar o romper partes del sistema con el fin de aislar materiales distintos. A continuación, proporcionamos una lista de herramientas que normalmente se utilizan con este fin:

* Pala
* Pata de cabra
* Sierra
* Cincel
* Destornillador
* Taladro
* Pico
* Mazo

Algunas empresas de demolición prefieren utilizar máquinas hidráulicas pequeñas o excavadoras compactas para deconstruir los sistemas de residuos de yeso, ya que suele avanzar más rápidamente. Sin embargo, esto supone restricciones adicionales de límites de peso y el hecho de que, en muchas habitaciones con espacio reducido, no es factible utilizar estas máquinas.

A picture containing indoor

Description automatically generated

***Figura 1. Sitio de demostración para la deconstrucción***

### 2.2.4. Técnicas de deconstrucción por sistema de residuos de yeso

La deconstrucción de un sistema de paneles de yeso generalmente puede seguir el mismo procedimiento que se utiliza para instalar el sistema de paneles de yeso, pero al revés. Antes de iniciar la deconstrucción de un sistema de paneles de yeso, es crucial desconectar los sistemas eléctricos o las instalaciones sanitarias que lo atraviesan, y determinar si la estructura a la que se acopla el panel de yeso tiene capacidad portante. Aunque el panel de yeso no resiste peso, si se determina que la pared tiene capacidad portante, el método de deconstrucción óptimo puede cambiar. Se puede incluir cualquier compuesto para juntas y cinta en el mismo flujo de residuos que los paneles de yeso.

##### 

#### 2.2.4.1. Técnicas de deconstrucción para sistemas fijados a un marco

El yeso se suele fijar a estructuras de acero (edificaciones comerciales) con tornillos o a estructuras de madera (edificaciones residenciales) con tornillos o clavos. Las técnicas de deconstrucción serán distintas; sin embargo, en todas se utilizan herramientas manuales para separar el panel de yeso de la estructura.

Cuando un sistema está fijado a una estructura por medio de tornillos, estos se pueden desentornillar, y cuando está fijado por medio de clavos, estos pueden quitarse con una pata de cabra. Otra técnica supone cortar el panel de yeso de la estructura con una sierra o separarlo con el borde de una pala. El panel de yeso se retira manualmente de la estructura junto con los tornillos y clavos. No se recomienda separar el panel de yeso del marco cuando se está renovando la estructura, ya que seguiría siendo necesario retirar los restos del panel de yeso y los herrajes. Ambas técnicas permiten la recolección del panel de yeso en fragmentos grandes, lo cual ahorra tiempo en la segregación y carga de los residuos.

Las técnicas descritas anteriormente son equivalentes en cuanto a rendimiento y variarán según los hábitos del trabajador y la disponibilidad de las herramientas [17]. Las técnicas que consisten en cortar y romper el panel de yeso generarán más fragmentos de placa y podrían suponer una mayor inversión de tiempo en la segregación [17].

No se recomienda utilizar las técnicas que exigen romper el panel de yeso con mazos o herramientas equivalentes, ya que generan fragmentos pequeños que requieren aun más tiempo para la segregación y aumentan el riesgo de contaminación por la presencia de otros materiales y humedad [17]. Asimismo, algunos fragmentos de panel de yeso que de otra forma serían aptos para reciclaje podrían perderse o permanecer en el suelo [17].

**Ejemplo**: Deconstrucción de un tabique de yeso clavado en una estructura de madera con una pata de cabra [17]:

1. Corte y rompa el panel de yeso con una pata de cabra o un cincel para cortar. Retire el panel de yeso manualmente (los elementos de sujeción permanecerán en la estructura).

2. Retire el aislamiento manualmente.

3. Retire la estructura de madera manualmente y con la ayuda de herramientas.

**Ejemplo**: Deconstrucción de un tabique con varias capas de paneles de yeso fijado a un marco de acero.

1. Retire con una pata de cabra el compuesto para juntas y otros materiales que ocultan los tornillos que aseguran el muro cortafuego a los pernos de acero.

2. Desatornille los tornillos que fijan el muro cortafuego a la estructura.

3. Retire el panel de yeso manualmente.

4. Retire el aislamiento manualmente.

5. Retire los pernos de acero manualmente y con la ayuda de herramientas.

**Ejemplo**: Deconstrucción de un sistema de paneles de yeso para cielorraso fijado a una estructura de madera

1. Con una pata de cabra, retire el compuesto para juntas y otros materiales que ocultan los tornillos u otros herrajes que fijan el panel de yeso a la estructura.

2. Desatornille los tornillos que fijan el panel de yeso a las vigas del cielorraso. Con la ayuda de un empleado o de un elevador de paneles de yeso mantenga el panel en su lugar para asegurarse de que este no se caiga.

3. Retire el panel de yeso después de haber retirado todos los tornillos de cada una de las secciones.

4. Retire el aislamiento manualmente.

#### 2.2.4.2. Técnicas de deconstrucción para paneles de cielorraso en una rejilla de techo

Los paneles de yeso para cielorraso que se apoyan sobre una rejilla de cielorraso (también conocidos como techos con barra en T, techos suspendidos y falsos techos) no suelen fijarse con herrajes y simplemente se apoyan sobre la rejilla.

Por lo tanto, se recomienda seguir los siguientes procedimientos:

1. Con la ayuda de un andamio seguro o una plataforma individual, un empleado retira los paneles de yeso no fijados. El empleado entrega estos paneles a otro empleado que está parado en el suelo.

2. Luego, el empleado desmantela la rejilla de cielorraso pieza por pieza y entrega las piezas al empleado que está parado en el suelo a medida que va desmantelando.

# 3. Reciclaje

Esta sección del informe abarca desde la recepción del material residual de yeso hasta la producción de YR (véase la sección **1.1.1.** para consultar las definiciones).

## 

## 3.1. Ubicación

Las plantas de reciclaje o los almacenes deben considerar la ubicación óptima para su funcionamiento durante la selección del emplazamiento y el otorgamiento de permisos de las instalaciones. Este paso es crucial para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos relacionados con el transporte [15]. También puede incentivar económicamente a las empresas de deconstrucción a priorizar el reciclaje en lugar de la eliminación en un vertedero. Se debe designar una ruta adecuada que funcione para minimizar las cargas sociales y medioambientales (alteración del ecosistema, degradación del valor de la tierra, congestión de tráfico, etc.). Podría ser más recomendable una instalación ubicada en un lugar menos céntrico si esto reduce los costos de las empresas de deconstrucción. Al seleccionar una ubicación, se deben considerar factores económicos como el canon de vertido, los precios del combustible y los salarios de los empleados.

## 3.2. Sistema de gestión de calidad (SGC)

Los SGC son una herramienta importante para demostrar el cumplimiento de los criterios de calidad del YR definidos por la empresa fabricante, así como para organizar, dirigir y registrar las acciones llevadas a cabo por el reciclador. Deben registrarse en un manual de operaciones de calidad cuyo alcance mínimo debe abarcar lo siguiente:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | | --- | --- | | EN | ESla | | **Arranging supply of waste materials** | **Organización del suministro de materiales residuales** | | Communicate acceptance criteria to suppliers | Comunicar los criterios de admisión a los proveedores | | Obtain information | Obtener información | | Apply acceptance criteria | Aplicar los criterios de admisión | | **Reject** | **Rechazar** | | Rejected material | Material rechazado | | **Accept** | **Aceptar** | | **Receipt of waste materials** | **Recepción de materiales residuales** | | Weigh | Pesar | | Inspect | Inspeccionar | | Apply acceptance criteria | Aplicar los criterios de admisión | | **Reject** | **Rechazar** | | Rejected material | Material rechazado | | Stockpile | Apilar | | **Processing** | **Procesamiento** | | Process | Procesar | | **Product verification** | **Verificación del producto** | | Sampling and testing | Muestro y ensayo | | Apply specifications | Aplicar especificaciones | | **Fail** | **Desaprobar** | | Non-conforming material | Material no conforme | | **Pass** | **Aprobar** | | **Storage and handling** | **Almacenamiento y manipulación** | | Packaging | Embalaje | | Storage | Almacenamiento | | Product dispatch | Despacho del producto | | Provide information and guidance | Proporcionar información y orientación | | Record information on use | Registrar información en uso | |

***Figura 2. Alcance mínimo del manual de operaciones de calidad [2]***

### 3.2.1. Criterios de admisión de residuos (WAC)

Se desarrollan y mantienen criterios WAC relacionados con el material para determinar si los residuos de yeso específicos son aceptables. Generalmente, los recicladores tienen sus propios WAC que reflejarán las capacidades de su operación. Sin embargo, los que se indican a continuación son WAC acordados con base en referencias por tres empresas de reciclaje que participaron en el proyecto GtoG:

***Tabla 1. WAC acordados con base en GtoG [18]***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Material | Aceptado | Aceptado después de la aprobación | Rechazado |
| Bloques de yeso | X |  |  |
| Cielorrasos de yeso, pisos, paredes, estuco | X |  |  |
| Residuos de yeso con clavos y tornillos, papel tapiz, tejido de vidrio y otros revestimientos de paredes | X |  |  |
| Escayola en bolsas | X |  |  |
| Moldura cóncava | X |  |  |
| Productos de yeso reforzado con fibra de vidrio (GRG) | X |  |  |
| Placas con papel aluminio y poliestireno |  | X |  |
| Placa de fibra de yeso |  | X |  |
| Molduras |  | X |  |
| Paneles de yeso para cielorraso |  | X |  |
| Panel de yeso con aislamiento |  | X |  |
| Materiales peligrosos, p. ej., asbesto |  |  | X |
| Placas unidas con cemento |  |  | X |

Otras consideraciones para los WAC que no se reflejan en esta tabla son un rango máximo de impurezas que oscilan entre el 2 % y el 3 %, y un contenido de humedad inferior al 10 % por peso [18].

### 3.2.2. Impurezas y sus efectos en el reciclaje

Algunos residuos de yeso no se pueden reciclar por la simple razón de que existen impurezas que son difíciles de separar. Aunque la mayoría de estos elementos se deben clasificar durante el proceso de descarga y antes de llevar a cabo el reciclaje, pueden quedar piezas diminutas en los residuos de yeso. La ausencia de un rango específico de impurezas y un contenido reducido de humedad son las especificaciones más comunes para la producción del YR por los recicladores [18]. En esta sección se explican las impurezas, los contaminantes y sus efectos.

##### 

#### 3.2.2.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad que supera un determinado umbral hace que sea difícil separar el papel del material de yeso. Asimismo, la presencia de humedad puede aumentar el combustible que se necesita para procesar los materiales e incluso puede ocasionar obstrucciones en las maquinarias. Si un fragmento de residuo de yeso tiene un nivel de humedad inaceptable, puede mezclarse con un fragmento más seco para equilibrar el contenido de humedad en general.

#### 3.2.2.2. Plásticos, laminados, piedras y materiales de aislamiento

Estas impurezas no suelen suponer un riesgo para las maquinarias, pero reducen la calidad de la producción de YR en general. Los plásticos, las piedras y el aislamiento pueden contaminar el polvo de YR y suelen terminar en el flujo de producción de papel.

##### 

#### 3.2.2.3. Presencia accidental de metales

Los metales no clasificados antes del proceso de reciclaje pueden bloquear las máquinas y generar averías. Algunas máquinas de reciclaje están diseñadas para manipular metales en la entrada y se pueden agregar imanes como parte del proceso de separación automatizado.

##### 

#### 3.2.2.4. Madera

Las piezas grandes de madera que no se retiran en la entrada pueden dañar la máquina y ocasionar que el material retroceda, evitando el movimiento hacia adelante del proceso. Una vez que los residuos de yeso se procesan en impurezas de madera más pequeñas, estos terminan en su mayoría en el flujo de papel.

##### 

#### 3.2.2.5. Anhidrita

La anhidrita de sulfato de calcio, otro contaminante, se encuentra generalmente en bloques y molduras y, a diferencia del yeso, no contiene agua cristalina y no se puede convertir en un material activo que puede calcinarse. En consecuencia, se debe evitar este material para que la calidad del YR siga siendo alta.

### 3.2.3. Recepción de residuos

##### 

#### 3.2.3.1. Organización del suministro de materiales de desecho

Los criterios de admisión que se utilizan para los residuos de yeso se deben desarrollar teniendo en cuenta la materia prima, las capacidades de procesamiento, los mercados finales y los reglamentos estatales. Es posible que algunos estados solo permitan procesar residuos de yeso nuevo. La planta de reciclaje de yeso debe comunicar los criterios de admisión de residuos de yeso y los requisitos de entrega descritos en el manual de operaciones. Se deben ilustrar el procedimiento para inspeccionar los paneles de yeso entrantes y determinar si cumplen con los criterios de admisión y se debe incluir una narrativa escrita de los detalles sobre la forma en que se espera que los empleados procesen los materiales entrantes. El manual de operaciones también debe incluir el procedimiento para manipular sustancias y materiales peligrosos de conformidad con los reglamentos locales, estatales y federales. Debe haber un registro de la inspección del material entrante, la decisión de aceptarlo o rechazarlo, y la documentación de la entrega.

#### 3.2.3.2. Punto de origen

La planta de procesamiento debe determinar el tipo de material que planea procesar y los mercados que va a atender. Esto afectará el tipo de panel de yeso que aceptará el procesador. Los criterios de admisión pueden consistir en clasificar el material por tipo, fuente y punto de origen. El tipo específico describirá las características físicas del panel de yeso. En el mercado se venden diversos tipos de paneles de yeso, incluidos paneles con densidad controlada, mayor resistencia, mayor dureza superficial, armadura de malla y tasa de absorción de agua reducida. La fuente del panel de yeso proporcionará información acerca del nivel de contaminación del panel de yeso. Los residuos de yeso procedentes de la fabricación de paneles de yeso o de paneles de yeso no utilizados procedentes de vendedores necesitarán menos procesamiento que los residuos de yeso procedentes de la demolición que se retira de las edificaciones. El punto de origen distingue entre los paneles de yeso de una obra de construcción o demolición y los paneles de yeso de una planta de recuperación de materiales que procesa residuos de C y D.

#### 3.2.3.3. Información proporcionada por el procesador

La información que proporciona el proveedor/generador ayuda a determinar si el procesador aceptará los residuos de yeso. Si el material no cumple con los criterios de admisión, entonces la planta puede determinar si considerarían aceptar los residuos en caso de que se cumplan ciertos criterios, por ejemplo, a través de la eliminación de un contaminante específico.

#### 3.2.3.4. Información proporcionada por el proveedor/generador de residuos

El procesador debe registrar la siguiente información del generador: descripción del material, cantidad en cada carga, número de cargas, embalaje del material, detalles del punto de origen, así como la fecha y la hora en que se entregó cada una de las cargas a la planta.

#### 3.2.3.5. Peso

Se debe comprobar el peso de todos los residuos de yeso para determinar el costo del canon de vertido. Esto suele lograrse pesando el vehículo que transporta los residuos a su llegada y a su partida.

##### 

#### 3.2.3.6. Inspección/tamizaje

Tras recibir los residuos de yeso, se debe realizar una inspección visual inicial para determinar si se cumple con los WAC. Una inspección secundaria realizada tras la aceptación del material permite la eliminación de materiales inadecuados que se pasaron por alto en la primera inspección, asegurándose así que la alimentación de residuos de yeso no ocasione daños en la máquina o una avería catastrófica [15]. De ser rechazada, la carga se enviará a una estación de transferencia en la que se puede volver a clasificar antes de ser nuevamente transportada a un reciclador o ser eliminada en un vertedero [15].



***Figura 3. Residuos de yeso en varias formas***

#### 3.2.3.7. Clasificación

Las operaciones de clasificación efectiva se deben realizar antes del procesamiento de residuos de yeso. Estas deben consistir en una operación de clasificación visual y manual que puede realizarse durante la inspección secundaria [15]. El nivel de impurezas suele reducirse al 2 % para evitar el riesgo de avería de la máquina y evitar el YR de baja calidad [15].

##### 

#### 3.2.3.8. Almacenamiento y apilamiento

Es crucial que los almacenes cuenten con almacenamiento adecuado para los residuos de yeso y YR [19]. Estos almacenes se deben diseñar y mantener de tal forma que se eviten los daños y la contaminación externa [19]. Los residuos de yeso que cumplen con los WAC se deben colocar en una pila en un lugar identificable en el que no puedan contaminarse, degradarse o captar humedad. El manual de operaciones debe indicar qué materiales se deben apilar por separado para los diferentes procesos o para producir diferentes tipos de YR. Las paredes y los pisos deben ser de concreto u otro material duro y estable, y los residuos de yeso se deben extraer del medio del bastidor para evitar raspar los lados y contaminarlos.

### 3.2.4. Procesamiento de residuos de yeso

Diferentes plantas operan diferentes equipos y cuentan con diferentes procesos, pero todas tienen la misma capacidad de producir YR. Como resultado, las recomendaciones de procesamiento son de índole general. Los procesos deben producir el o los grados deseados de yeso de conformidad con un grupo de procedimientos operativos estándar (SOP). Los procesos también deben centrarse en la eliminación de contaminantes en los residuos de yeso (incluido el papel residual). Se recomienda eliminar los contaminantes en la fase más temprana posible, ya que esta labor se vuelve considerablemente más difícil después de que los residuos de yeso se han reducido de tamaño. Asimismo, la eliminación temprana ofrece la mayor probabilidad de producir un material de papel apto para el reciclaje [2].

A picture containing indoor

Description automatically generated

***Figura 4. Maquinaria de procesamiento de residuos de yeso de Scott Equipment Company***

#### 3.2.4.1. Preprocesamiento de residuos de yeso

El proceso de reciclaje se debe organizar de tal manera que se garantice la segregación del material entrante y saliente. Los operadores de la planta pueden utilizar diferentes métodos para reciclar paneles de yeso; sin embargo, los principales componentes son la separación, la reducción de tamaño y el tamizaje. En general, después de que se aceptan los residuos de yeso para su procesamiento, se llevan a un muelle de descarga donde pueden ser clasificados por tipo de panel de yeso y procesamiento previsto. Los residuos de yeso se cargan en una cinta clasificadora (transportadora). Se suelen utilizar imanes para eliminar metales ferrosos por anticipado. Luego, el material se puede clasificar manualmente para eliminar los contaminantes que pueden dañar el equipo de procesamiento y reducir el valor del producto final.

#### 3.2.4.2. Reducción de tamaño

Los residuos de yeso se reducirán de tamaño para producir polvo de yeso y papel. El papel se separa del yeso para crear un producto de mayor calidad para sus respectivos mercados. Las trituradoras, los pulverizadores y los tamices rotativos son tipos de equipos comunes que los recicladores de yeso utilizan para romper el material.

#### 3.2.4.3. Tamizaje de residuos de yeso

Los tamices se utilizan para separar el yeso de tamaño reducido del papel y otros elementos diversos. El yeso pasa por el tamiz mientras que el papel y otras piezas más grandes se quedan en la superficie del tamiz, desde donde pueden ser transportados para su almacenamiento o eliminación.

A picture containing text

Description automatically generated

***Figura 5. Producto final de YR***

#### 3.2.4.4. Granulometría

La granulometría del yeso se puede controlar con el tamaño del tamiz elegido. El mercado final previsto determinará el tamaño de las partículas de yeso producidas, ya que algunos mercados prefieren materiales más grandes que otros. El contenido de papel será un factor que determinará el mercado final; sin embargo, por lo general, los mercados prefieren un contenido más bajo de papel. Por ejemplo, el contenido de papel del yeso reciclado limita la frecuencia de su uso para hacer paneles de yeso nuevos, ya que afecta la clasificación de resistencia al fuego.

##### 

#### 3.2.4.5. Generación de polvo

El procesamiento de yeso generará polvo, el cual puede mitigarse tomando las medidas adecuadas, que podrían implicar rociar agua y utilizar sistemas de ventilación en las áreas activas del procesamiento de yeso.

### 3.2.5. Eliminación y reciclaje de papel residual

Generalmente, el papel que se recupera del procesamiento de paneles de yeso se puede reciclar o reutilizar. Sin embargo, es posible que el papel residual esté contaminado con revestimientos especializados, como fibra de vidrio, pintura, retardadores de humedad y revestimientos resistentes a las llamas, que podrían hacer que el material sea un residuo peligroso característico o que no sea apto para el reciclaje. Asimismo, el papel eliminado en el reciclaje de residuos de yeso podría contener yeso residual y almidón, así como contaminantes como clavos, cintas adhesivas, fragmentos de madera, juntas, etc. Estos objetos deben retirarse antes de considerar los residuos de papel para reciclaje.

#### 3.2.5.1. Contaminantes preocupantes

El papel reciclado debe cumplir con todas las normas basadas en riesgos aplicables, especialmente si se considera su aplicación al medioambiente. Entre los materiales que tradicionalmente se utilizan en construcción y que podrían contaminar el papel residual y convertirlo en un residuo peligroso se encuentran los siguientes:

* Plomo: metal pesado que se puede encontrar en la pintura a base de plomo que se utilizaba en los revestimientos de papel de las casas antiguas.
* Mercurio: metal pesado que se encuentra en las bombillas fluorescentes y los termómetros que podrían contaminar los residuos de papel en la deconstrucción.
* Arsénico: metal pesado que a veces se utiliza en el tratamiento de madera y que podría contaminar los residuos de papel en la deconstrucción.
* Pintura a base de aceite: podría hacer que el revestimiento de papel se convierta en un residuo peligroso característico de inflamabilidad.
* Asbesto: fibra aislante natural que se utilizaba en gran escala. Puede estar en estrecho contacto con el panel de yeso.
* Policlorobifenilos (PCB): sustancia orgánica tóxica que antiguamente se utilizaba en lastre, pinturas y masillas. Problema de contaminación durante la deconstrucción.
* Boro: no es un residuo peligroso preocupante, pero es relevante para su aplicación al medioambiente.
* Éteres de difenilo polibromado (PDBE): aplicación directa al revestimiento de papel como retardadores de llamas (aplicado en el campo y no en la producción). Se han desarrollado dosis de referencia establecidas por la EPA, así como niveles de detección en suelo residencial, suelo industrial y agua potable [20]:

***Tabla 2. Niveles de detección de la EPA para PDBE en suelo y agua potable [17]***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Sustancia química | Suelo residencial  (mg/kg) | Suelo industrial  (mg/kg) | Agua potable  (μg/L) |
| decaBDE-209 | 440 | 3300 | 112 |
| octaBDE | 160 | 2300 | 61 |
| tetraBDE-47 | 6.3 | 82 | 2.0 |
| hexBDE-153 | 13 | 160 | 4.0 |
| pentaBDE-99 | 6.3 | 82 | 2.0 |

Un estudio realizado por el Centro de Experiencia en Análisis Ambiental de Quebec (Quebec Center of Expertise in Environmental Analysis) indicó que la concentración de mercurio medida en los residuos de papel de yeso no se podía explicar en función al mercurio presente naturalmente en el yeso [21]. Esto sugiere una fuente de contaminación alternativa (fuera de la producción) que inhabilitaría su aprovechamiento [21].

A picture containing text, old

Description automatically generated

***Figura 6. Flujo de papel tras la separación de los residuos de yeso***

### 3.2.6. Control de calidad

El procesador debe desarrollar un protocolo de control de calidad que debe especificarse en el manual de operaciones con el fin de describir los procedimientos para una gestión efectiva de todas las operaciones y actividades de calidad asociadas necesarias para producir yeso reciclado con un alto valor de mercado. Este protocolo se debe documentar, aplicar y comunicar a todo el personal involucrado en la gestión de calidad del material.

##### 

#### 3.2.6.1. Procedimiento de muestreo y ensayo

Se debe desarrollar un procedimiento de muestreo mediante el cual se recolecten muestras periódicamente para determinar la calidad y la composición del yeso reciclado (YR). Los parámetros de preocupación son la distribución granulométrica, el contenido de yeso, los contaminantes físicos y la composición química.

##### 

#### 3.2.6.2. Muestreo representativo

Se debe obtener una muestra representativa mediante la recolección de muestras de la pila de yeso o tomando muestras regulares de la línea de procesamiento antes de que llegue a la pila. Las muestras se pueden recolectar de una pila seleccionando aproximadamente veinte áreas en una pila de muestreo. Se deben retirar del área las seis pulgadas superiores antes de obtener las muestras. Luego, las muestras recolectadas se mezclan para formar una muestra homogénea. El segundo método de muestreo se puede realizar en incrementos de una hora durante una jornada laborable. Las muestras se mezclan y se colocan en un recipiente limpio y sellado para crear una muestra homogénea representativa de una jornada completa de producción. Luego, esta muestra mezclada se puede someter a ensayo para comprobar los parámetros antes mencionados.

##### 

#### 3.2.6.3. Frecuencia de análisis

Se debe realizar una inspección visual frecuente de la producción del polvo de yeso reciclado y papel para asegurarse de que la distribución granulométrica se encuentre en el rango correcto. Esto debe estar acompañado del muestreo periódico de muestras representativas, seguido del ensayo de granulometría y el balance de masa del contenido de papel residual. La frecuencia del análisis dependerá de la normativa del estado.

La frecuencia de los ensayos se debe acordar entre el reciclador y el fabricante. En general, se recomienda comprobar los parámetros toxicológicos mensual o trimestralmente, dependiendo del volumen de polvo reciclado que se suministra. Se recomienda comprobar los parámetros técnicos semanal o mensualmente. Es posible que algunos parámetros tengan que comprobarse diariamente, dependiendo de la ubicación, p. ej., humedad y cloruro [22].

### 3.2.7. Manipulación, embalaje y transporte de materiales

El YR se debe manipular, almacenar y transportar siguiendo un método que evite la contaminación. El procedimiento para cada uno se debe desarrollar y registrar teniendo en cuenta el método de despacho, el mercado final y la entrega del material final.

#### 3.2.7.1. Embalaje del producto

El embalaje utilizado para el producto debe ser a prueba de agua para evitar que se dañe durante el transporte. Si se utiliza una bolsa grande u otro embalaje abierto, el producto embalado se puede envolver en una película termoencogible de polietileno para evitar que se dañe con el agua. Los productos embalados se deben apilar y asegurar en un palé para evitar el daño y la entrada de agua desde abajo. El almacenamiento de YR debe seguir los procedimientos descritos en la sección *3.2.3.8.* El producto debe embalarse de conformidad con cualquiera de las normas específicas requeridas. En caso de no existir dichas normas, el embalaje debe incluir la siguiente información: grado del material, cantidad, instrucciones de almacenamiento, directrices y condiciones de uso, y un código de lote o identificación similar.

A couple of gravestones in a grassy area with trees in the background

Description automatically generated with low confidence

***Figura 7. Embalaje y etiquetado del yeso para uso agrícola***

#### 3.2.7.2. Transporte del producto

Se debe incluir la información de contacto del procesador junto con cualquier organización que participa en la reventa del producto. Esta información se puede imprimir en el embalaje o en un documento por separado. Cualquier producto que sale de la planta se debe registrar incluidos los residuos de papel y del procesamiento.

## 3.3. Requisitos de calidad del YR

Es probable que los fabricantes cuenten con sus propios criterios de calidad al considerar la aceptación del YR para su producto. Aun así, las siguientes secciones están diseñadas a manera de guía para proporcionar más información durante el proceso de toma de decisiones tanto para el reciclador como para el fabricante. Incluyen los criterios legales y recomendados relevantes que ambas partes deben conocer cuando se produce, acepta y utiliza el YR. Tenga en cuenta que, a menos que sea exclusivo de procesos que se realizan en el reciclaje o la fabricación, ambas partes deben acordar la responsabilidad de cumplir con estos requisitos.

### 3.3.1. Ciclo cerrado y requisitos generales

Generalmente, la fabricación de paneles de yeso sigue una serie de pasos [19]:

* Calcinación: procesamiento térmico del yeso para cambiar el estado de hidratación (produce estuco).
* Producción de lechada: mezcla de estuco con agua y aditivos líquidos para crear una lechada que eventualmente formará el núcleo del panel de yeso.
* Formación de la placa: la lechada se coloca entre hojas de papel para formar hojas continuas de panel de yeso.
* Fraguado y corte: transporte en una cinta transportadora para dejar que fragüe y se adhiera al revestimiento de papel antes de endurecerse lo suficiente para poder cortarlo mientras se acerca al final de la línea.
* Secado y terminado: ingreso al horno de secado, donde se elimina el exceso de humedad libre.

##### 

#### 3.3.1.2. Requisitos legales para el uso en los paneles de yeso

Los paneles de yeso fabricados o importados para utilizarse en Estados Unidos a partir del 22 de junio de 2015 deben cumplir con el Título 15, Sección 2056 del Código de EE. UU. [23]. Esto exige una restricción en el contenido de azufre detallado en la norma ASTM C1396-14a [24]. Tenga en cuenta que este documento ha sido actualizado por el Subcomité de ASTM C11.01 sobre Especificaciones y Métodos de Prueba para Productos de Yeso y estas actualizaciones no se reflejan en el estatuto actual; sin embargo, los requisitos no han cambiado con las ediciones posteriores de C1396.

#### 3.3.1.3. Recomendaciones para el reciclaje de ciclo cerrado y uso general

Para que la escayola o el panel de yeso con YR sea considerado aceptable en Norteamérica, estos deben cumplir con las normas ASTM C22, ASTM C28, ASTM C1396 y ASTM C1264 [16], [24]–[26]. Posiblemente se pueda incorporar el YR en otras formas de paneles de yeso, como los descritos en las normas ASTM C1177, C1178 y C1658, pero esto no se ha verificado.

Es posible que fabricantes y plantas específicos cuenten con sus propios criterios; sin embargo, se recomienda que el YR de alta calidad destinado para utilizarse en escayola o paneles de yeso cumpla con las siguientes normas técnicas y toxicológicas desarrolladas en el informe GtoG:

***Tabla 3. Parámetros técnicos para el YR [22].***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parámetro | Unidad | Lineamientos GtoG sobre criterios de calidad del YR | Método de ensayo |
| Granulometría | mm | 0-15 | ASTM D6913 |
| Humedad libre | % p/p | <10 | AOAC 965.08 |
| Pureza | % p/p | >80 | ASTM C471M-17a |
| Carbón orgánico total (COT) | % p/p | <1.5 | U.S. EPA 9060A |
| Sales de magnesio, sol. en agua | % p/p | <0.1 | AAS o ICP OES |
| Sales de sodio, sol. en agua | % p/p | <0.06 | AAS o ICP OES |
| Sales de potasio, sol. en agua | % p/p | <0.05 | AAS o ICP OES |
| Cloruro soluble | % p/p | 0.02 | Potenciometría, cromatografía iónica o titulación o determinación fotométrica |
| pH |  | 6-9 | U.S. EPA 9045D |

***Tabla 4. Parámetros toxicológicos para el YR [22]***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parámetro | Unidad | Lineamientos GtoG sobre criterios de calidad del YR | Método de ensayo |
| As | mg/kg | <4.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Be | mg/kg | <0.7 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Pb | mg/kg | <22.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Cd | mg/kg | <0.5 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Cr | mg/kg | <25.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Co | mg/kg | <4.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Cu | mg/kg | <14.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Mn | mg/kg | <200.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Ni | mg/kg | <13.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Hg | mg/kg | <1.3 | U.S. EPA 7471B |
| Se | mg/kg | <16.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Te | mg/kg | <0.3 | U.S. EPA 6010D |
| Tl | mg/kg | <0.4 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| V | mg/kg | <26.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Zn | mg/kg | <50.0 | U.S. EPA 3050B,6010d |
| Asbesto | sí/no | no | Método EPA 600/R- 93/116 |
| Índice R | <0.5 | <0.5 | Documento RP 112 (CE) |

Es importante destacar que estos son valores de referencia que no representan las concentraciones por encima de las cuales existe un riesgo para la salud humana. Se basan en estudio científico único de toxicidad en el yeso y fueron acordados por los participantes en el GtoG [22], [27].

##### 

#### 3.3.1.4. Granulometría

El control granulométrico del yeso es un parámetro acordado entre el reciclador y el fabricante, y es crucial para obtener las propiedades exactas de estuco deseadas para la fabricación de paneles de yeso específicos.

Es un factor determinante para lograr una transferencia de calor uniforme en el calcinador. Asimismo, influye significativamente en la demanda de agua al influenciar en la viscosidad de la lechada de estuco [19]. La granulometría del YR difiere de la del yeso natural (YN) y el yeso de desulfurización de gases de combustión (DGC) en que suele ser más pequeña y fina [19]. Para reducir los efectos no deseados, la granulometría del yeso debe ser compatible con la materia prima convencional que se está utilizando.

#### 3.3.1.5. Humedad libre

La humedad libre es el total de agua que no está unida químicamente al panel de yeso y cuya presencia afecta la relación de masa materia prima/estuco. Puesto que la cantidad de materia prima seca de una pureza determinada para producir una (1) tonelada de estuco es específica, la relación materia prima/estuco aumenta cuando la materia prima está más húmeda [19]. La humedad libre también aumenta los requisitos de energía de la calcinación (ya que a más humedad se necesita un mayor consumo de combustible) [19]. El YR (si se almacena y se traslada correctamente) suele tener un menor contenido de humedad en comparación con el yeso natural y DGC [19]. Esto puede reducir el consumo energético. La cantidad de una materia prima específica que una planta de yeso puede incorporar en su mezcla suele estar determinada por la capacidad térmica del sistema de secado [28]. En consecuencia, el porcentaje máximo factible del YR reincorporado, no el proceso, puede estar limitado por un alto contenido de humedad libre. Asimismo, el estuco con un alto contenido de humedad libre tiene una mayor tendencia a adherirse y a acumularse en el equipo transportador, y la proliferación de moho es un motivo de preocupación en casos de alto contenido de humedad libre [19].

#### 3.3.1.6. Pureza

La pureza es el índice de calidad más importante del yeso como materia prima. Debido a la naturaleza endotérmica de la calcinación, cuanto más alta sea la pureza, más alta será la demanda de energía térmica. Esto se debe a que la materia prima contiene más agua químicamente enlazada que se debe liberar [19]. Sin embargo, el material de alta pureza es preferible para la calidad del producto, principalmente porque reduce el peso del panel de yeso [28]. Generalmente, el YR tiene una menor pureza que el yeso natural y el DGC, lo cual da lugar a un menor consumo energético, pero también produce limitaciones de calidad para el producto final.

##### 

#### 3.3.1.7. Contenido de papel y fibra residual (TOC)

El papel residual es un factor limitante en la reincorporación del YR a los procesos de fabricación. Las escamas de papel influyen en la consistencia de las materias primas y puede formar aglomeraciones en la masa de yeso calcinado [19]. En las unidades de calcinación que se calientan indirectamente, las piezas de papel tienden a pegarse en las paredes de los recipientes y forman capas de aislamiento que impiden la transferencia de calor [19]. En la producción real de los paneles de yeso, el exceso de contenido de papel puede causar obstrucciones de mezclado y aumentar la demanda de agua (lo cual conlleva una mayor demanda energética en el proceso de secado) [19]. También pueden afectar la clasificación de resistencia al fuego y las especificaciones generales del panel de yeso [19]. No solo el contenido de papel, sino también el tamaño del papel es una variable preocupante en la producción de planchas de yeso, ya que las piezas más grandes tienden a ocasionar más obstrucciones en los equipos.

Otro factor limitante de la tasa máxima de reincorporación del YR es su contenido de fibra de celulosa [19]. La fibra es difícil de retirar por completo del YR e impide la transferencia de calor en la calcinación.

Generalmente, se utiliza el TOC como métrica del contenido de papel y de fibra [19].

##### 

#### 3.3.1.8. Sales solubles en agua

Las sales solubles en agua se refieren a las sales de cloruro, magnesio, sodio y potasio. La presencia de estas sales en la materia prima puede afectar la capacidad de adherencia del papel en la producción de paneles de yeso [19].

Durante el proceso de secado, migran a la interfaz papel/núcleo de yeso e interfieren en la adherencia [4]. La concentración de cloruro de la materia prima es particularmente importante, ya que afecta la tasa de conversión de la calcinación [19]. Tenga en cuenta que las sales solubles en agua son impurezas comunes en el YN convencional. En consecuencia, este no es un problema específico del YR y es probable que ya exista la infraestructura para gestionar las sales solubles en agua. No obstante, el contenido de sales solubles en agua puede seguir siendo un problema en el YR y debe limitarse. El mayor contenido de sales solubles en el YR también podría estar relacionado con un alto contenido de papel debido a su capacidad para absorber agua [19].

##### 

#### 3.3.1.9. Contenido de silicona

Los aditivos en el núcleo del panel de yeso son los responsables de la presencia de siliconas en el yeso reciclado, así como de la modificación posterior al consumo (es decir, la adición de azulejos de cerámica) [19]. En el caso de que se incluya un panel de yeso resistente al agua en el proceso de reciclaje, el material podrá tener un contenido de silicona relativamente alto [29]. Las siliconas son hidrofóbicas y pueden causar variabilidad en la absorción de agua durante la producción de la lechada fluida [29]. Esto ocasiona la formación de ampollas y burbujas en el núcleo, así como una mayor demanda de energía térmica en la secadora de placas [27], [28]. Algunos paneles de yeso tienen aditivos de cera que crean resistencia al agua, lo cual no es un motivo de preocupación, ya que no son resistentes al calor de la calcinación.

La difracción de rayos X (XRD) se utiliza para identificar si el SiO2 presente es de naturaleza amorfa o cristalina. La norma ASTM C471M Métodos de prueba estándar para el análisis químico de yeso y productos de yeso – Sección 10 describe un método químico húmedo para determinar el SiO2 y la materia insoluble [4].

##### 

#### 3.3.1.10. Otras impurezas

Durante su entrega a una planta de fabricación, el YR no debe contener contaminación física visible y debe tener concentraciones bajas de impurezas químicas para evitar comprometer la calidad del producto terminado. Es necesaria una especificación con límites para los valores de los elementos traza, en su mayoría metales pesados, para que el YR evite dañar al ser humano y al medioambiente. Se debe prestar especial atención a la ausencia absoluta de asbesto, que fue un criterio categórico para la admisión del YR en el proyecto GtoG [19].

#### 3.3.1.11. pH de la materia prima

El pH del YR no se considera un parámetro importante siempre que no sea altamente ácido [19]. En tal caso, podría afectar la calidad del producto final de panel de yeso. Es preferible un pH neutro o ligeramente alcalino que coincida con el del YN.

### 

### 3.3.2 Requisitos para el uso agrícola

##### 

#### 3.3.2.1. Procesamiento específico para el uso agrícola

Para producir el producto de yeso reciclado de más alta calidad, se deben seguir las recomendaciones presentadas. En el caso de los residuos de yeso destinados a ser utilizados como enmienda, el procesamiento podrá ser más o menos intensivo dependiendo de los suelos en los que se utilizarán. Por ejemplo, la remoción del papel residual y la limitación del TOC que es obligatoria cuando se utiliza YR en ciclo cerrado o como aditivo en el clínker de cemento podría no ser tan importante o incluso necesaria para su uso como enmienda agrícola. Como resultado, es probable que los residuos de yeso que están destinados a utilizarse como fertilizante o enmienda de suelos no necesiten separar sus residuos de papel. Sin embargo, el contenido de papel podría impedir un flujo adecuado durante la aplicación en un entorno agrícola. Existe una serie de fuentes de literatura que recomiendan ciertas composiciones de yeso para optimizar propiedades específicas del suelo [30]. No obstante, estos informes son muy individualizados y se recomienda que los expertos correspondientes investiguen los requisitos de la tierra según cada caso para determinar las características físicas y químicas óptimas del YR para su tierra.

#### 3.3.2.2. Requisitos legales para el uso agrícola

Antes de que el YR se pueda reaprovechar en una aplicación sobre el terreno, se deben comparar las concentraciones de metales pesados, sulfatos y calcio con los umbrales reguladores basados en el riesgo que abordan el riesgo potencial para los humanos o el medioambiente a través de la exposición directa o la lixiviación en aguas subterráneas. Los vendedores deben distribuir YR teniendo en cuenta estos umbrales. El material que no cumpla con las especificaciones reguladoras se puede volver a procesar en menores concentraciones de contaminantes o eliminar en un vertedero.

#### 3.3.2.3. Recomendaciones específicas para el uso agrícola

Si bien las concentraciones medidas pueden y deben compararse con los umbrales del suelo limpio y agua subterránea utilizados para materiales derivados de residuos, estos umbrales generalmente asumen que el material se aplicará como relleno de suelos. Un método más adecuado para evaluar el potencial del YR en la aplicación sobre el terreno podría ser comparar las concentraciones químicas medidas con los estándares de la enmienda de suelos. En el Código 333 Estándares de Prácticas de Conservación, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) proporciona un ejemplo de normas para la aplicación de yeso como enmienda [31]. Cabe destacar que este no es un grupo de estándares obligatorios por ley, pero tiene que ver con la elegibilidad para el programa de conservación del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NCRS) [32].

A tractor in a field

Description automatically generated with medium confidence

***Figura 8. Aplicación de YR sobre la tierra***

### 3.3.3. Requisitos para el uso en clínker de cemento

##### 

#### 3.3.3.1. Requisitos legales para el uso en clínker de cemento

Aunque es poco probable, es posible que algunos contaminantes presentes en el yeso reciclado puedan suponer un riesgo para la salud humana en el proceso de fabricación del cemento Portland. Por lo tanto, se debe cumplir con las Normas Nacionales de Emisiones para Contaminantes Atmosféricos Peligrosos de la industria de fabricación de cemento Portland cuando corresponda [33]. Asimismo, la producción de clínker de cemento con YR sigue estando sujeta a las Directrices y Normas relativas a la Fabricación de Cemento de la EPA, que regulan la descarga directa e indirecta de contaminantes derivados de la fabricación de cemento [34].

#### 3.3.3.2. Recomendaciones específicas para el clínker de cemento

Se ha demostrado (de forma limitada), que el YR se puede utilizar en el clínker de cemento y producir propiedades mecánicas aceptables [35], [36]. Sin embargo, existe información limitada relativa a la calidad óptima del YR para su uso específico en el clínker de cemento. La literatura disponible sugiere que la principal diferencia entre el YN y el YR es la presencia de mayores niveles de hemihidrato [35], [36]. Se ha demostrado que interviene en la reducción de los tiempos de fraguado del cemento Portland y debe ser controlado adecuadamente [35]. Fuera de este parámetro, se recomienda que los recicladores persigan los mismos criterios de calidad determinados en las recomendaciones para YR que se utilizarán en los paneles de yeso.

En cuanto al contenido de yeso que será añadido al clínker de cemento, la cantidad de yeso debe representar entre el 3 % y aproximadamente el 5 % de la masa de cemento [37]. Si el contenido de yeso supera este límite, reducirá la resistencia del cemento e incluso puede dar lugar a una estabilidad dimensional deficiente [37]. Además, el exceso de yeso también podrá acelerar el fraguado de cemento, ya que puede generar un agente coagulante por sí mismo [37]. Si el contenido de yeso es demasiado bajo, el efecto retardante será mínimo [37]. Normalmente, la cantidad adecuada de yeso dependerá del contenido de C3A en el cemento, el SO3 en el yeso, la finura del cemento y el contenido de SO3 en el clínker [37]. Sin embargo, en el caso del YR, la distribución porcentual por masa de las especies de sulfato de calcio se convierte en otro tema de preocupación y actualmente carece de parámetros específicos.

# 4. Fabricación

Esta sección está destinada a abarcar consideraciones específicas cuando un fabricante decide incorporar YR en la fabricación de su producto.

## 4.1. Consideraciones de fabricación para la producción de paneles de yeso

El YR se utiliza conjuntamente con DGC y YN para producir el estuco utilizado en la fabricación de paneles de yeso. La razón es que la calidad no estándar del YR limita su uso en la producción de paneles de yeso a un máximo de entre el 20 % y el 30 % [19]. Esto se logró sin una inversión permanente de equipos e infraestructura [19]. También necesita ajustes en la fórmula, que exigen una mayor cantidad de aditivos. Los fabricantes señalan que las limitaciones en la capacidad del sistema de alimentación y los problemas relacionados con la calidad del yeso reciclado, principalmente el contenido de papel residual y, en menor medida, la humedad libre y la pureza, son los principales factores que impiden el mayor aumento de la tasa de reincorporación durante los ensayos [19]. Mezclar YR no deseado con fracciones deseadas es una práctica habitual para mejorar la calidad en general [19].

### 

### 4.1.1. Almacenamiento de YR

El almacenamiento de YR en un entorno de fabricación requiere específicamente que se asigne suficiente espacio de almacenamiento para alcanzar cierto nivel de homogeneidad entre las características fluctuantes de las cargas entrantes. Se debe contemplar el almacenamiento por separado para el YR aislado que se prevé devolver.

### 4.1.2. Alimentación de materia prima

Podría ser necesario que los fabricantes de paneles de yeso que alimentan materias primas rediseñen sus sistemas de alimentación. Un mayor porcentaje de YR en materia prima requerirá ajustes de velocidad o la mejora del equipo de alimentación mecánica [19].

### 4.1.3. Ajustes en el procesamiento

El uso de YR puede requerir ajustes en las siguientes áreas dependiendo de la variabilidad de la materia prima de YR y la capacidad de la operación de fabricación:

* Control de la temperatura
* Fórmula de la lechada
* Demanda de agua
* Uso de aditivos (licuefactores, dispersantes, etc.)

Encontrará más información acerca de las variables específicas que necesitan estos ajustes en el apartado *3.2.8*.

#### 4.1.3.1 Equipos e infraestructura

Se ha demostrado que se puede incorporar YR sin una inversión permanente en equipos de fabricación e infraestructura [19]. La falta de YR puede ser un factor limitante para la incorporación de este material. Depende del fabricante específico determinar si se desea realizar la modificación o ampliación del equipo y la infraestructura existentes.

### 4.1.4. Tiempo de fraguado

El comportamiento de fraguado del núcleo de escayola de la placa está influenciado por la variabilidad del YR [19]. Sin embargo, el tiempo de fraguado de la lechada se puede manipular utilizando aditivos especiales y ajustando la velocidad de la línea de placas [19]. La solución óptima probablemente sea una combinación de ambos métodos.

## 4.2. Consideraciones de fabricación para la producción de paneles de yeso

### 

### 4.2.1. Ensayos de producción

Las variaciones de YR se abordan individualmente [19]. Las fluctuaciones de calidad se han superado ajustando el porcentaje de yeso natural o DGC en su alimentación, modificando los parámetros de calcinación y secado, y utilizando aditivos para lograr la calidad necesaria del estuco [19].

##### 

#### 4.2.1.1. Limitaciones en la incorporación de YR

A continuación, se detallan categorías generales para los factores más comunes y restrictivos que limitaron la incorporación de YR según la experiencia de cinco fabricantes que participaron en el proyecto GtoG:

* Limitaciones físicas en el espacio de almacenamiento y gestión de material reciclado, incluido el limitado espacio disponible para el almacenamiento por separado del material aceptado y fuera de especificación destinado a devolverse.
* Desbordamientos y restricciones debido a la capacidad limitada (restricciones de volumen o potencia de motor y velocidad) de las cintas transportadoras disponibles.
* Problemas con el contenido de papel y el tamaño de los fragmentos de papel residual. Obstrucciones en el tamiz, burbujas o bultos en la escayola, o falta de adherencia entre el núcleo y los revestimientos de los paneles de yeso.
* Problemas en las unidades de dosificación de estuco que contienen un alto porcentaje de YR debido a la reducción de la densidad del estuco.
* Problemas con el secado de los paneles de yeso. El comportamiento de los paneles de yeso con alto contenido de YR ocasionó el secado en exceso de las placas.
* Capacidad limitada de detección técnica de contaminantes no visibles en el YR. Esto incluye fibras (principalmente asbesto), contaminantes químicos y materiales peligrosos. Esto produce retrasos debido al largo tiempo que se necesita para procesar los resultados de los análisis.
* Se necesitan métodos de prueba rápidos mediante los que se pueda determinar la calidad de cada carga.

#### 4.2.1.2. Maximización del YR

A continuación, se detallan las adaptaciones del proceso que se utilizaron para superar las restricciones que se identificaron anteriormente, basadas en las experiencias de cinco fabricantes que participaron en el proyecto GtoG:

* Instalación de unidades de pesaje adicionales para un control más preciso del contenido de YR.
* Cambios en la velocidad del equipo. Aumento de la velocidad de la cinta transportadora a su nivel máximo para alcanzar una tasa de alimentación suficiente de YR y reducción de la velocidad límite para reducir la tasa de alimentación de estuco.
* Separación de la fase del proceso de finalización de la producción de estuco con alto contenido de YR (dosis separada de calcinación, silos separados utilizados, vaciado y llenado del sistema total de estuco, etc.).
* Ajustes en la fórmula con respecto a los aditivos químicos en la lechada de estuco (ajustes en el acelerador, la espuma y los aditivos licuefactores).

#### 4.2.1.3. Modificaciones del equipo

A continuación, se indican las modificaciones del equipo que se estiman necesarias en caso de que la maximización de la reincorporación de YR se convierta en una práctica habitual, teniendo en cuenta las experiencias de cinco fabricantes que participaron en el proyecto GtoG:

* Aumento de la capacidad de la cinta transportadora con una mayor potencia de motor (más rápida y más amplia) para la alimentación de YR.
* Controles para variar el contenido reciclado cuando se suministra a diversas áreas de la fábrica.
* Ampliación del sistema completo de preprocesamiento de YR (es decir, molienda, secado, tamizaje, almacenamiento) incluida la incorporación de un quemador de gas para el secado del YR antes de mezclarlo, lo cual permitirá una mezcla más eficaz con el yeso convencional y una molienda de grado fino del YR con niveles muy altos de eliminación de papel.
* Pruebas de humedad en línea a lo largo de la cinta de alimentación de YR antes de su mezcla con materia prima convencional.
* Ampliación de los sistemas completos de transferencia y dosificación en la calcinación.

#### 4.2.1.4. Problemas de reincorporación con escayola

Los componentes de adherencia que se utilizan en la producción de escayola requieren yeso de muy alta calidad. Como resultado, los parámetros de calidad del YR deben coincidir, en la mayor medida posible, con los de una materia prima convencional para poder incluirlo. Esto exige que se eliminen por completo las impurezas como el papel, la fibra de vidrio, la silicona, el aceite y la fibra de madera [19].

##### 

#### 4.2.1.5. Problemas de reincorporación con paneles de yeso

Puesto que la calidad de la mezcla de materia prima variará con un aumento en el contenido de YR, deberá ajustarse todo el proceso (sistema de reciclaje, calcinación, almacenamiento, dosificación, fórmulas y sistema de secado). Esto le da una gran importancia al suministro constante de YR de alta calidad que cumple con las especificaciones de la cadena de suministro para garantizar la estabilidad del proceso y la calidad de las placas [19].

##### 

#### 4.2.1.6. Limitaciones y consideraciones

En la opinión de los fabricantes de GtoG, la calidad actual del YR lo hace inadecuado para su uso en la fabricación de productos más técnicos que requieren una mayor pureza [38].

Solo se realizaron ensayos en un tipo de placa y el efecto de la reincorporación de YR en otros tipos de planchas de yeso debe seguir evaluándose.

Asimismo, los ensayos de los estudios se llevaron a cabo en dos rondas de pocas horas con cinco fabricantes de paneles de yeso (para un total de diez ensayos de producción) durante las cuales fue necesario evaluar los impactos del proceso de forma constante. Se sugirió que los fabricantes incluyen un posible refuerzo para aumentar la pureza del YR a través de métodos de limpieza química (aunque esto podría tener un costo exorbitante) [38].

## 4.3. Consideraciones de fabricación para el uso en clínker de cemento

El comportamiento de fraguado del cemento se atribuye principalmente a la reacción del aluminato tricálcico con agua, conocida como fraguado instantáneo [35]. El yeso se añade al clínker de cemento durante la trituración del cemento Portland en un molino de bolas con el fin de evitar esta reacción. Como ya se mencionó, se ha demostrado que el YR puede actuar como sustituto directo del YN en la producción de cemento Portland ordinario [35], [36]. Sin embargo, la composición inicial del YR parece contener mayores cantidades de hemihidrato; aunque esto está sujeto a variabilidad dependiendo de la fuente del YR [35], [36].

La deshidratación del yeso y la formación del hemihidrato se producen naturalmente en un molino de cemento industrial [36]. Esta conversión tiene un efecto diverso en el fraguado y en la resistencia a la compresión dependiendo de la composición del retardante de fraguado [39]. Puesto que la composición inicial del retardante de fraguado (YR) es distinta del YN, el grado de conversión del dihidrato y el contenido del hemihidrato final serán diferentes y deben controlarse correctamente. Esto se puede obtener regulando la temperatura y la humedad relativa del clínker en el molino [39]. Al controlar estos dos parámetros con la cantidad de agua rociada en el molino, se puede definir la temperatura y humedad óptimas para un grado de deshidratación idóneo. Actualmente, no se cuenta con información en la literatura que determine el grado óptimo de deshidratación de yeso. Sin embargo, un estudio concluyó que la mezcla óptima exige alcanzar los niveles requeridos de trabajabilidad, retención de la trabajabilidad e hidratación temprana, que generalmente se obtienen con cementos que tenían la menor cantidad de yeso deshidratado (hemihidrato) [40].

### 4.3.1 Estudio de referencia

A continuación, se incluyen los resultados del análisis químico de un estudio de las composiciones de YN y YR (de moldes para colada de barbotina) como una referencia sobre la forma en que las composiciones químicas del YN y el YR (el estudio lo denomina «yeso de desecho») pueden diferir:

***Tabla 5. Proporciones de yeso para dihidrato, hemihidrato y anhidrita [28]***

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Componentes | Yeso natural (%) | Yeso de desecho (%) |
| Dihidrato | 91.28 | 80.90 |
| Hemihidrato | 1.61 | 12.45 |
| Anhidrita | 4.32 | 4.34 |
| Otras impurezas | 2.79 | 2.30 |

***Tabla 6. Composición química de referencia del yeso natural y de desecho [28]***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Componente | Análisis químico (% p) | | |
|  | Clínker | Yeso natural | Yeso de desecho |
| SiO2 | 21.304 | 1.90 | 0.93 |
| CaO | 65.746 | 35 | 37 |
| Al2O3 | 6.107 | 0.63 | 0.16 |
| Fe2O3 | 3.829 | 0.28 | 0.17 |
| MgO | 1.626 | - | 0.97 |
| K2O | 0.838 | 0.13 | 0.03 |
| SO3 | 0.74 | 41 | 42 |
| NiO | - | 0.02 | 0.02 |
| SrO | - | 0.09 | 0.13 |
| Cal libre | 0.782 | - | - |
| LOI | - | 20.4 | 18 |

Luego, el estudio compara las diferencias entre las diversas propiedades mecánicas como el tiempo de fraguado, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el área de superficie de las muestras con diferentes cantidades de yeso natural (YN) y yeso de desecho (YD):

***Tabla 7. Nombres y composiciones de muestras de clínker utilizadas en las pruebas de diversas propiedades mecánicas [28]***

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Símbolo | CM97NG | CM96NG | CM95NG | CM97WG | CM96WG | CM95WG |
| CL (%) | 97 | 96 | 95 | 97 | 96 | 95 |
| YN (%) | 3 | 4 | 5 | - | - | - |
| YD (%) | - | - | - | 3 | 4 | 5 |

***Tabla 8. Comparación de la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el área de superficie de las muestras de clínker de YN y YD [28]***

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Muestra | Resistencia a la compresión (MPa) | | | Resistencia a la flexión (MPa) | | | Área de superficie (cm2/g) |
|  | 2 días | 7 días | 28 días | 2 días | 7 días | 28 días |  |
| CM97NG | 16.05 ± | 31.43 ± | 49.2 ± 1.3 | 3.59 ± | 5.78 ± | 6.30 ± | 3816 |
|  | 0.2 | 0.5 |  | 0.1 | 0.3 | 0.3 |  |
| CM96NG | 18.92 + | 33.83 + | 52.82 + | 4.08 + | 6.38 + | 7.07 + | 3637 |
|  | 0.2 | 0.4 | 1.1 | 0.1 | 0.3 | 0.4 |  |
| CM95NG | 21.82 + | 36.05 + | 50.7 + 0.8 | 4.39 + | 6.62 + | 7.81 + | 3691 |
|  | 0.4 | 1.2 |  | 0.1 | 0.4 | 0.1 |  |
| Promedio | 18.93 | 33.77 | 50.91 | 4.02 | 6.26 | 7.06 | 3714.67 |
| CM97WG | 18.45 + | 37.15 + | 53.25 + 2 | 3.96 + | 6.49 + | 7.51 + | 3785 |
|  | 0.8 | 1.9 |  | 0.1 | 0.4 | 0.2 |  |
| CM96WG | 18.95 I | 32.13 + | 51.75 + 1 | 4.17 + | 6.37 + | 7.16 + | 3948 |
|  | 0.1 | 0.6 |  | 0.1 | 0.1 | 0.1 |  |
| CM95WG | 17.25 + | 31.98 + | 51.77 + | 3.71 + | 5.87 + | 7.79 + | 3785 |
|  | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 1.3 | 0.4 |  |
| Promedio | 18.22 | 33.75 | 52.26 | 3.95 | 6.24 | 7.49 | 3839.33 |

***Tabla 9. Comparación de los tiempos de fraguado para las muestras de clínker de YN y YD [28]***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Muestra | Agua/Cemento (%) | Tiempo de fraguado inicial (minutos) | Tiempo de fraguado final (minutos) |
| CM97NG | 26.25 | 138 | 169 |
| CM96NG | 26.50 | 140 | 174 |
| CM95NG | 26.50 | 134 | 169 |
| Promedio | 26.42 | 137.33 | 170.67 |
| CM97WG | 26.25 | 98 | 125 |
| CM96WG | 26.25 | 125 | 164 |
| CM95WG | 26.00 | 126 | 153 |
| Promedio | 26.17 | 116.33 | 147.33 |

Estos resultados demuestran que la mayor proporción del hemihidrato característico del YR parece acelerar el tiempo de fraguado, pero no tiene un efecto significativo en la resistencia del cemento. Se requieren más estudios para verificar la validez de estos resultados.

# 5. Conclusión

El yeso es un material que, en teoría, se puede reciclar indefinidamente. Este informe está diseñado para ayudar a las empresas de deconstrucción, los recicladores y los fabricantes en la consecución de esta iniciativa. Se consideran tres mercados finales teóricamente viables: agricultura, paneles de yeso y clínker de cemento. Aunque este informe obtiene información de todas las fuentes disponibles, la literatura para los mercados fuera del reciclaje de ciclo cerrado es limitada y requiere más investigación. Asimismo, el cuerpo de trabajo que describe el reciclaje de ciclo cerrado en paneles de yeso nuevos es limitado, ya que solo analiza un tipo de panel de yeso. Todavía no se ha evaluado el uso de YR en tipos especializados (tipo C, insonorizado, etc.). El aprovechamiento del YR ha despertado mayor interés en Europa occidental. La CDRA espera que este informe promueva una iniciativa similar en Norteamérica.

**Referencias**

[1] LIFE, *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*. LIFE, 2016. [En línea]. Disponible en: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\_proj\_id=4191

[2] B.S.I., *PAS 109: Specification for the Production of Reprocessed Gypsum from Waste Drywall*, BSI, 2013, [en línea]. Disponible en: https://standards.globalspec.com/std/1151358/BS%20PAS%20109

[3] T. Tolaymat, M. Krause, J. Smith, y T. Townsend, *The State of the Practice of Construction and Demolition Material Recovery*, US EPA, 2017, [en línea]. Disponible en: https://cfpub.epa.gov/si/si\_public\_record\_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=338319

[4] K. Yang, Q. Xu, T. G. Townsend, P. Chadik, G. Bitton, y M. Booth, *Hydrogen Sulfide Generation in Simulated Construction and Demolition Debris Landfills: Impact of Waste Composition*, J. Air Waste Manag.Assoc., vol. 56, n°. 8, pp. 1130–1138, ago. 2006, doi: 10.1080/10473289.2006.10464544.

[5] S. E. Musson, Q. Xu, y T. G. Townsend, *Measuring the gypsum content of C&D debris fines*, Waste Manag., vol. 28, n°. 11, pp. 2091–2096, nov. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.09.012.

[6] Y.-C. Jang y T. Townsend, *Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines*, Adv. *Environ.* Res., vol. 5, n°. 3, pp. 203–217, ago. 2001, doi: 10.1016/S1093-0191(00)00056-3.

[7] R. Xu *et al.*, *Boron as a contaminant at construction and demolition (C&D) debris landfills*, Waste Manag., vol. 109, pp. 85–93, may. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.051.

[8] N. Calvo, L. Varela-Candamio y I. Novo-Corti, *A Dynamic Model for Construction and Demolition (C&D) Waste Management in Spain: Driving Policies Based on Economic Incentives and Tax Penalties*, Sustainability, vol. 6, n°. 1, Art. n°. 1, ene. 2014, doi: 10.3390/su6010416.

[9] *Lead Based Paint Activities*, Código de Reg.Fed., vol. Parte 745, Título 40, 1995.

[10] H. Canada, *Lead-based paint*, Nov, vol. 15, 2010, [en línea]. Disponible en: https://www.canada.ca/en/health-canada/services/home-safety/lead-based-paint.html

[11] *National Emission Standard for Asbestos*, Código de Reg.Fed., vol. Parte 61, Título 40, 1990.

*[12] Interim Method of the Determination of Asbestos in Bulk Insulation Samples. Código de Reglamentos Federales*, AnexoE, Subparte E, Parte, vol. 763, Título 40, 1990.

[13] *Hazardous Substances Other than Hazardous Products*, en Reglamento Canadiense de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Parte X, División II, 2022.

[14] L.I.F.E., *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*, LIFE, n°. DB2, 2016, [en línea]. Disponible en: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\_proj\_id=4191

[15] L.I.F.E., *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*, LIFE, n°. DA2, pp. 33–55, 2016.

[16] *Standard Specification for Sampling, Inspection, Rejection, Certification, Packaging, Marking, Shipping, Handling, and Storage of Gypsum Panel Products, ASTM C1264- 19.* ASTM International, 8 de oct. de 2019.

[17] L.I.F.E., *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*, LIFE, n°. DB1, 2016, [en línea]. Disponible en: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\_proj\_id=4191

[18] L.I.F.E., *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*, LIFE, n°. DB3, 2016, [en línea]. Disponible en: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\_proj\_id=4191

[19] L.I.F.E., *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*, LIFE, n°. DB4, pp. 10–37, 2016.

[20] U.S. EPA, *Technical Fact Sheet - Polybrominated Diphenyl Ethers (PDBEs).* U.S. EPA, Nov. 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/fedfac/technical-fact-sheet- polybrominated-diphenyl-ethers-pbdes-and-polybrominated-biphenyls-pbbs

[21] MoEFCC, *Assessing the danger potential of Gypsum paper residues, potentially valued as animal litter material,* MoEFCC, sep. 2019, [en línea]. Disponible en: https://www.3rmcdq.qc.ca/client\_file/upload/Table%20Gypse/Gypse201913092019.pdf

[22] L.I.F.E., *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*, LIFE, n°. DC2, 2016, [en línea]. Disponible en: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\_proj\_id=4191

[23] *Código de Estados Unidos*, en Título 15: COMERCIO Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS*.* CAPÍTULO 47: SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS DE CONSUMO, 2020.

[24] *Standard Specification for Gypsum Board, ASTM C1396/C1396M-17*, ASTM Int., ene. 2022.

[25] *Standard Specification for Gypsum Plasters, ASTM C28/C28M-10*, ASTM Int., jul. 2020.

[26] *Standard Specification for Gypsum, ASTM C22.* ASTM International, 7 de mayo de 2021.

[27] J. Beckert, *Comparison of natural gypsum and FGD gypsum: studies for a comparative assessment of the health impact of natural gypsum and FGD gypsum from coal-fired power plants with a view to their use in the manufacture of building materials*. VGB- Kraftwerkstechnik GmbH, Verlag Techn.-Wiss. Schr., 1990.

[28] P. J. Henkels and J. C. Gynor, *Characterizing synthetic gypsum for wallboard manufacture*, Prepr.Pap. Am. Chem. Soc.Div. Fuel Chem., vol. 41, n°. 2, Art. n°. CONF-960376-, dic. 1996, consultado: 10 de ago. de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.osti.gov/biblio/430284-characterizing-synthetic-gypsum-wallboard- manufacture

[29] Henry, *Environmental, Health, & Safety Impact of Common Water Resistant Additive Technologies In Gypsum Wallboard Production.* Henry, 2010. [En línea]. Disponible en: https://henry.com/fileadmin/pdf/literature/EHS\_Global\_Gypsum\_Conference.pdf

[30] D. Kuttah and K. Sato, *Review on the effect of gypsum content on soil behavior*, Transp.Geotech*.*, vol. 4, pp. 28–37, sep. 2015, doi: 10.1016/j.trgeo.2015.06.003.

[31] *Conservation Practice Standard 333: Amending Soil Properties with Gypsum Products.* Servicio de Conservación de Recursos Naturales; Estados Unidos, ene. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA\_NRCSConsumption/download?cid=nrcseprd155946 5&ext=pdf

[32] C. S. Program, *Código de Reglamentos Federales, Parte 1470*, Título, vol. 7, 2021.

[33] *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from the Portland Cement Manufacturing Industry*, Código de Reg.Fed., vol. Parte 63, Título 40, 2022.

[34] Código de Reglamentos Federales, *Cement Manufacturing Point Source Category*, Parte, vol. 411, Título 40, 2021.

[35] C. Chandara, K. A. M. Azizli, Z. A. Ahmad y E. Sakai, *Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement*, Waste Manag., vol. 29, n°. 5, pp. 1675–1679, may. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.11.014.

[36] N. Flores Medina, F. Hernández-Olivares, X. Arroyo, A. Aguilera y F. Fernandez, *Characterization of a more sustainable cement produced with recycled drywall and plasterboards as set retarders*, Constr*.* Build.Mater*.*, vol. 124, pp. 982–991, oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.140.

[37] H. Zhang, Ed., *4 - Cement*, en Building Materials in Civil Engineering, Woodhead Publishing, 2011, pp. 46–423. doi: 10.1533/9781845699567.46.

[38] L.I.F.E., *GtoG (Gypsum to Gypsum) - From Production to Recycling a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry*, LIFE, n°. DB4, pp. 58–59, 2016.

[39] G. Tzouvalas, G. Rantis y S. Tsimas, *Alternative calcium-sulfate-bearing materials as cement retarders: Parte II.* *FGD gypsum*, Cem*.* Concr.Res*.*, vol. 34, n°. 11, pp. 2119–2125, nov. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.03.021.

[40] S. Dean, S. Farrington y B. Christensen, *Hydration Behavior of Portland Cements with Different Hemihydrate/Gypsum Ratios in the Presence of Common Chemical Admixtures*, J. Astm Int., vol. 2, feb. 2005, doi: 10.1520/JAI12478.