

# Propuesta de reutilización y reciclaje de residuo sólido industrial de grafito.

1<sup>st</sup> Laura Camila Cárdenas Forero  
*Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*  
*Ingeniería Mecánica*  
Bogotá, Colombia  
laura.cardenas-f@mail.escuelaing.edu.co

2<sup>nd</sup> Adriana Esguerra Arce  
*Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*  
*Ingeniería Industrial*  
Bogotá, Colombia  
adriana.esguerra@escuelaing.edu.co

**Resumen**—El grafito en el plano industrial tiene una gran aplicabilidad, siendo el uso más común y el más conocido en la fabricación de minas para lápices, pero su uso también se encuentra en industrias como la automotriz, para la fabricación de materiales de fricción, escobillas y juntas, la metalúrgica, siendo las industria refractaria la que más lo utiliza para aumentar la resistencia al choque térmico y a la corrosión a sus productos, la química o en la fabricación de lubricantes, donde se utiliza como polvo sólido, entre otras aplicaciones. En el presente informe se realiza un estudio de las propiedades físicas y químicas del grafito, se mencionan las principales aplicaciones industriales del grafito, así como su impacto ambiental y la posible reutilización del este. Se analiza el manejo de los residuos sólidos y se realiza una propuesta para la disposición y manejo de estos residuos, con el fin de reducir el impacto ambiental e incentivar a la reutilización como una actividad industrial cuando se maneje este tipo de materiales.

**Index Terms**—Aplicaciones, grafito, impacto ambiental, propiedades, reutilización, residuos.

## I. INTRODUCCIÓN

El amplio uso del grafito en la industria actual en diversas aplicaciones como la automotriz, metalúrgica o en la fabricación de lubricantes da campo a que se generen grandes cantidades de residuos sólidos por el uso de este material, generando que se presente un importante impacto ambiental al no disponer de estos de forma correcta. Esta es una problemática de gran importancia, así como también presenta posibilidades para presentar propuestas y planes de gestión para mejorar el manejo de los residuos generados.

Actualmente existen normativas que rigen el manejo de residuos como la GTC 24, el decreto 4741 de 2005 y al CONPES 3874. Este último documento presenta la introducción de la economía circular para el manejo de residuos sólidos, siendo esta una actividad que esta tomando gran importancia, debido a que incentiva el reciclaje y la reutilización de los residuos generados en un proceso, dando lugar a una reducción de la contaminación ambiental. Por este motivo, se presenta un estudio de las problemáticas mencionadas, así como del manejo que se realiza en la disposición de este tipo de residuos, con la finalidad de proponer una alternativa para el manejo y reutilización de los residuos sólidos del grafito.

Debido a que este proyecto se realiza en conjunto con CORONA, empresa interesada en un manejo adecuado del grafito que genera como residuo; a continuación se hablará un poco de su historia.

## II. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

### II-A. Corona

#### ■ Historia

Las semillas de la empresa fue la fundación de la Compañía Cerámica Antioqueña, el 13 de agosto de 1881, la cual haciendo uso de los depósitos de arcilla se dedicó a la producción de loza, como también de artículos de vidrio y alfarería en general. Esta empresa en 1906 fue comprada por una familia de empresarios exitosos, en ese momento dedicados a la exportación de café, los Echavarría, los cuales unos años después invertirían más en la empresa logrando más producción y también mayor variedad de producto.

En 1950, se fundó en Bogotá la Compañía Colombiana de Cerámica. La familia Echavarría en esta década también delegó la administración en profesionales independientes. En 1955, nació Porcelana Sanitaria, dedicada a la elaboración de productos sanitarios, y dadas las necesidades del país en estos productos hizo crecer a la empresa. En 1962 se inició la construcción de la planta de Grival, para la producción de grifos y accesorios metálicos, y en 1963 nació Sumicol para explotar minas. Estas empresas junto a otras más pequeñas fueron la base que representan lo que hoy es Corona.

A finales de la década del 80 y todavía estando a cargo de la empresa la tercera generación de los Echavarría, se decide hacer una expansión para conquistar mercados externos, intensidad y enfoque que se tiene aun hoy en día. Para lograr esta meta se necesitaba primero profundizar su integración, por lo tanto se reforzó el mercadeo y la distribución de sus productos al crear en 1994 las cadenas de almacenes HomeCenter, en asocio con la empresa chilena Sodimac. En 1996, Corona empezó a trabajar con el esquema de holding de inversión (junto con Carvajal fueron los primeros en usar esta estrategia). La experiencia funcionó y se complementó con la creación en el año 2000 de una gerencia de gestión

integral de la compañía.

Corona hoy en día lleva una trayectoria en el mercado de 134 años y se caracteriza por ser una compañía ágil y proactiva. La reciente compra del 34 % de la empresa Mansfield en Estados Unidos, demuestra el alcance, la ambición y las metas que tiene aún por delante la empresa.

#### ■ *Empresa*

Corona hoy en día es una multinacional colombiana con más de 138 años de historia empresarial dedicada a la manufactura y comercialización de productos para el hogar, la construcción, la industria, la agricultura y el sector de energía. Está compuesta por cuatro divisiones de negocios – y dos unidades comerciales que son Almacenes Corona y Comercial Corona Colombia. Cuenta con 20 plantas de manufactura en Colombia, 2 en Estados Unidos, 3 en Centro América y 3 en México, así como con una oficina de suministros globales en China. En alianza con Cementos Molins de España, se encuentra desarrollando a través de Empresa Colombiana de Cementos el negocio para la producción y venta de cemento en Colombia. Genera más de 9.000 empleos y exporta sus productos a diversos mercados alrededor del mundo, incluyendo Estados Unidos, Canadá, México, Brasil, Chile, Venezuela, Centro América, el Caribe, Italia, España y el Reino Unido.

En cuanto al nivel productivo como previamente se había mencionado, la organización es prevista para suplir las necesidades dadas en un sector específico, para lo cual cuentan con 4 divisiones de negocios, los cuales ofrecen gran variedad de productos, estas son:

- División de baños y cocinas: La cual se dedica al desarrollo y fabricación de productos que conforman soluciones integrales para baños y cocinas. Ofrece una gran variedad de productos que incluyen aparatos sanitarios, lavamanos, accesorios, asientos sanitarios, griferías, duchas, herrajes, muebles, elementos de plomería y gasfitería y cocinas.
- División de superficies, materiales y pinturas: La cual se dedica al desarrollo y fabricación de productos para la construcción y remodelación que incluyen revestimientos (pisos, paredes y decorados), materiales de construcción (pegantes, boquillas, morteros, limpiadores, herramientas de instalación, estucos, yesos, pinturas, acabados texturizados, masillas tipo joint compound, masillas joint free, masillas para revoque en seco, masillas para acabados, aditivos para morteros, juntas, sellos e impermeabilizantes, entre otros) soluciones y sistemas constructivos que hacen más fácil y rápida la construcción teniendo en cuenta el cuidado de salud del encargado de la operación de construcción.
- División de insumos industriales y energía: La cual está compuesta de dos negocios. El negocio de insumos industriales produce insumos y materias primas para la industrias de cerámica, vidrio, pintura y agricultura.

El segundo negocio de energía fabrica y comercializa productos además de soluciones para las empresas y distribuidores del sector de energía eléctrica e industrial, y es el distribuidor para Colombia de la línea de productos para protección y maniobra de media y alta tensión de Hyundai. Desde el 2013 participa en el negocio de refractarios a través de la adquisición de la Empresa de Refractarios Colombianos (Erecos).

- División de mesa servida: Es uno de los fabricantes más antiguos y reconocidos de vajillas de Colombia y Latinoamérica, así mismo comercializa cristalería y cubertería para completar su oferta para la mesa servida. Produce y comercializa tres líneas de productos a través de las marcas Vajillas Corona y LC (en México y Argentina): una para el hogar con múltiples y variadas colecciones; otra institucional dirigida a atender el mercado de hoteles y restaurantes; y una de Mugs. Desde el 2013 es el distribuidor exclusivo del portafolio institucional de la marca portuguesa Vista Alegre en Colombia, además de ser la división con más canales de comercio a países de toda América.

#### *II-B. Residuos industriales*

En relación con los procesos de fabricación utilizados en la manufactura de estos productos, la empresa produce una cantidad considerable de residuos industriales de todo tipo. Un residuo importante en cantidad es el grafito, proveniente de los procesos de fundición. Antes de continuar hablando de este residuo, se hablará de los residuos sólidos en general y la normatividad relacionada.

Se entiende como residuo cualquier tipo de material inútil o no deseado en el momento de una evaluación funcional de algún proceso generado por la actividad humana y que está destinado a ser desechado. Se consideran dentro de este grupo los que figuran en el Listado Europeo de Residuos (LER), aprobado por las instituciones comunitarias. Esta definición de residuo, de acuerdo con lo establecido en la Ley 10/1998, de 21 de abril (básica de residuos), constituye el actual marco legal de referencia y la base sobre la que se desarrollan las diferentes clasificaciones de residuos en función de las actividades que los generan.

Adaptando la previa definición de residuo a la industria se puede definir a los residuos industriales como aquellos residuos obtenidos por la actividad industrial, ya sea por las acciones de extracción, explotación, producción o fabricación, transformación, almacenamiento y distribución de productos, de los que la empresa se desprende o tiene la obligación de desprenderse. Existen diferentes tipos de residuos industriales definidas ya sean por su origen o por las características de los mismos. La labor de clasificar los residuos corresponde a la empresa, es una obligación legal, ya que el fin del conocimiento sobre su clase es definir la forma más adecuada de tratar los residuos generados. Las clases de residuos industriales son:

- No peligrosos: Se refieren a aquellos materiales que a pesar de no tener un uso aprovechable en el momento de la revisión no tienen ningún riesgo para la salud ni contaminan el medio ambiente. Este tipo de residuos tienen a su vez dos subdivisiones.

- Residuos asimilables a urbanos: Son los que a pesar de ser obtenidos mediante procesos industriales tienen una composición similar a los residuos urbanos (RU). Suelen ser recogidos y tratados de forma similar al resto de los RU.
- Residuos inertes: Son los que ya depositados en vertederos, no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Un ejemplo de este tipo de residuos son los escombros, gravas, arenas. En general son residuos no peligrosos para la salud y el medio ambiente. Cabe aclarar que esta clasificación es subjetiva ya que depende de a que proceso han sido sometidos o los procesos para los cuales se han usado pueden ser peligrosos, como por ejemplo si han estado en procesos relacionados con explotación minera o en procesos de extracción y transporte de petróleo.

Dentro de la clasificación de residuos no peligrosos existen otros residuos que no interactúan de manera nociva con el medio con el cual están en contacto, como por ejemplo algunos lodos de depuración no peligrosos.

- Peligrosos: Aquel clasificado como no reciclable o nocivo para la salud y para el medio ambiente.

Una profundización en la clasificación de los diferentes tipos de residuos y ejemplificaciones, se remite a la sección de normatividad, ya que a partir de estas en cada país se encuentran ciertos parámetros los cuales se enfocan de mejor manera.

Para que la clasificación pueda ser llevada a cabo actualmente se cuenta con tres herramientas:

1. Lista europea de residuos (LER).
2. Ficha de datos de seguridad.
3. Caracterización analítica de un residuo.

La gestión de residuos es llevada a cabo a partir de la elaboración del inventario de residuos que permita conocer de forma clara la cantidad y las características de los residuos generados. En este se debe incluir el nombre del residuo, la cantidad, naturaleza, origen, destino, transporte utilizado en el desplazamiento y método de valorización o eliminación. Respecto al método de valorización al cual se pueden someter ciertos tipos de residuos se retomará en el siguiente ítem que habla acerca de la economía circular.

## II-C. Normativa de disposición de residuos

- CONPES 3874:

Este documento explica cómo realizar la gestión integral mediante la inclusión de la economía circular con un enfoque complementario para una gestión sostenible e integrada de los residuos sólidos. Esto se esquematiza a través de la Figura 1, desarrollado por ONU-Habitat (2010). Este marco distingue tres componentes físicos (triángulo de la izquierda) de los sistemas de gestión de residuos sólidos: los servicios de recolección de residuos, la eliminación ecológica y las 3R (reducir, reutilizar, reciclar) centradas en el valor económico y en el agotamiento de los recursos, como premisas para el avance hacia una economía circular.



Figura 1. Marco analítico de los dos triángulos [16]

-Manejo de residuos: El manejo integral de los residuos comprende su generación, separación en la fuente, recolección, transferencia y transporte, aprovechamiento, tratamiento y su disposición final. Por lo tanto se indica un orden de prioridad en la gestión de residuos mediante una jerarquía, mostrada en la Figura 2, en la cual se establecen primero medidas para prevenir que se generen residuos como primer paso para implementar la economía circular, la siguiente medida, por orden de prioridad, consiste en aplicar las 3R en residuos sólidos, es decir reducir el impacto de los mismos mediante la reutilización y el reciclaje. Después sigue el tercer nivel en donde se encuentran las acciones de tratamiento de residuos no aprovechables para: (I) la reincorporación de los materiales a procesos productivos; (II) la valorización a través de generación de energía antes de ser dispuestos; o (III) la reducción del volumen o tamaño antes de su disposición final.

La última clasificación en términos de prioridad es la disposición final, ya sea en rellenos sanitarios o mediante incineración sin valorización energética. Esta medida es el último recurso para los residuos sólidos que no se han podido evitar, desviar o recuperar en los pasos anteriores.

- GTC 24:

Este documento es una guía sobre la separación, disposición, transporte, almacenamiento y clasificación de residuos sólidos. También incluye la explicación y énfasis de otras guías que hablan sobre temas de disposición para la implementación de la norma CONPES 3874. Cabe destacar de esta guía que muestra una clasificación explícita sobre cada tipo y clasificación de residuo, como se observa en el cuadro 1.

- NOM-004-SEMARNAT-2002:

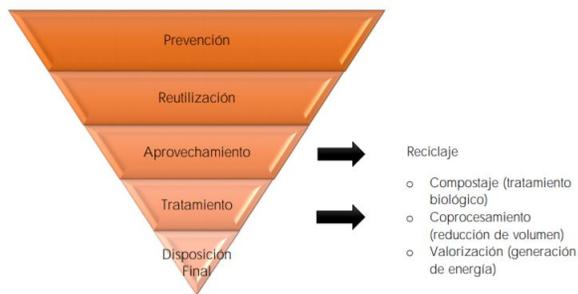


Figura 2. Diagrama de clasificación de gestión de residuos [16]

Cuadro I  
EJEMPLOS DE RESIDUOS PELIGROSOS Y NO PELIGROSOS SEGÚN SECTOR INDUSTRIAL

Tipo de residuo	Clasificación	Ejemplos
Residuos no peligrosos	Aprovechable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cartón y papel (hojas, plegadiza, periódico, carpetas).</li> <li>- Vidrio (Botellas, recipientes)<sup>A</sup>.</li> <li>- Plásticos (bolsas, garrafas, envases, tapas)<sup>A</sup>.</li> <li>- Residuos metálicos (chatarra, tapas, envases)<sup>A</sup>.</li> <li>- Textiles (ropa, limpiadores, trapos)</li> <li>- Madera (aserrín, palos, cajas, guacales, estibas)</li> <li>- Cuero (Mopa, accesorios)</li> <li>- Empaques compuestos (cajas de leche, cajas jugo, cajas de licores, vasos y contenedores desechables)<sup>A</sup></li> </ul>
	No aprovechable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Papel tissue (papel higiénico, paños húmedos, pañales, toallas de mano, toallas sanitarias, protectores diarios)</li> <li>- Papeles encerados, plastificados, metalizados</li> <li>- Cerámicas</li> <li>- Vidrio Plano</li> <li>- Huesos</li> <li>- Material de barrido</li> <li>- Colillas de cigarrillo</li> <li>- Materiales de empaque y embalaje sucios</li> </ul>
	Orgánicos Biodegradables	Residuos de comida Cortes y podas de materiales vegetales hojarasca
Residuos peligrosos		<p>A nivel doméstico se generan algunos de los siguientes residuos peligrosos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pilas, lámparas fluorescentes, aparatos eléctricos y electrónicos</li> <li>- Productos químicos varios como aerosoles inflamables, solventes, pinturas, plaguicidas, fertilizantes, aceites y lubricantes usados, baterías de automotores y sus respectivos envases o empaques.</li> <li>- Medicamentos vencidos</li> <li>- Residuos con riesgo Biológico tales como: cadáveres de Animales y elementos que ha entrado en contacto con bacterias, virus o microorganismos patógenos, como agujas, residuos humanos, limas, cuchillas, entre otros.</li> </ul> <p>Para el manejo de estos residuos se recomienda no mezclarlos e informarse acerca de diferentes entidades que se encargan de su gestión.</p> <p>A nivel industrial, institucional y comercial esta reglamentado con base en la legislación vigente (véase anexo A)</p>
Residuos especiales		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escombros</li> <li>- Llantas usadas</li> <li>- Colchones</li> <li>- Residuos de gran volumen como por ejemplo: muebles, estanterías, electrodomésticos.</li> </ul> <p>Para el manejo de estos residuos se recomienda informarse acerca de servicios especiales de recolección establecidos.</p>
<p><sup>A</sup> Se recomienda que los envases estén enjuagados y secos para garantizar su valorización</p> <p>NOTA 1 Para que los residuos no sean clasificados como peligrosos no pueden estar impregnados o haber estado en contacto con sustancias clasificadas como peligrosas.</p>		

Es una norma mexicana que trata específicamente de lodos y biosólidos, sus especificaciones, además de los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, como se observa en el cuadro 2. En esta norma encontramos varios tipos de lodos, enfocándose en valores principales para metales sólidos en sólidos.

También podemos encontrar valores recomendados de frecuencia de análisis para estas muestras, según la cantidad

Cuadro II  
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSÓLIDOS.

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

producida, de acuerdo a como se observa en el cuadro 3.

Cuadro III  
FRECUENCIA DE MUESTREO PARA LODOS EN FUNCIÓN DE SU CANTIDAD.

Volumen generado por año (Ton/año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Entre 1500 y 15000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor a 15000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

- Decreto 4741 de 2005: El fin de este decreto es la clasificación, componentes y el énfasis en la prevención de la generación de residuos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos o desechos generados a nivel nacional y así poder garantizar la sanidad de las personas que generen, gestionen o manejen dichos residuos. Tiene principalmente en cuenta la clasificación por medio de la prueba de de lixiviación para característica de toxicidad (TCLP).

#### II-D. Objetivos de desarrollo sostenible

Son propósitos que los países miembros de la ONU determinaron en el 2015 con el fin de disminuir el impacto negativo en diferentes aspectos que el ser humano esta provocando, con miras a que en el 2030 todos estos impactos sean nulos en cualquier país, sea este desarrollado o no, con el fin de equilibrar la sostenibilidad medioambiental, económica y social.

- Objetivo N°12:** Para lograr los objetivos económicos, sociales e industriales propuestos es necesario que se replanteen los métodos de producción y obtención de

recursos.

La administración correcta de los recursos naturales compartidos, la manera planteada de eliminación y/o disposición de los desechos tóxicos y los contaminantes son vitales para lograr este objetivo, el cual se logrará mediante la transformación, adaptación y capacitación por parte de las diferentes industrias, negocios e inclusive de los consumidores para reciclar y reducir los desechos, creando un desarrollo completamente sostenible.

## II-E. Economía circular

La economía circular tiene como base principal el modelo cíclico de la naturaleza, el cual funciona como un sistema de aprovechamiento de recursos donde prima la reducción de la producción de los elementos al mínimo posible, y también conlleva que al momento de hacer uso de algún producto, se produzca una reutilización de los elementos que no sean biodegradables, con el fin de que estos no afecten de manera negativa al medio ambiente [7]. En la figura 1 se observa un diagrama que representa la economía circular y el pensamiento de la reincorporación y reciclaje de los materiales.



Figura 3. Diagrama representativo de la economía circular [9].

De acuerdo a lo anterior, la economía circular procura utilizar en su mayoría materiales biodegradables, o los llamados materiales *eco-friendly*, para la fabricación de productos de consumo, con el fin de que éstos, una vez terminen su vida útil, puedan retornar a la naturaleza causando el mínimo de impacto. En dado caso cuando no sea posible el uso de éstos materiales, como por ejemplo para la fabricación de baterías, componentes electrónicos, entre otros, el principal objetivo que se busca es facilitar un desacople sencillo con el fin de poder darle una nueva vida útil al producto reincorporándolo al ciclo de producción para que haga parte de la producción de una nueva pieza [7].

Algunas de las ventajas que se presentan al aplicar una economía circular en una empresa consisten en el cambio de pensamiento y focalización, donde antes predominaba

el aspecto económico y ahora se da especial importancia al aspecto social o medioambiental. También se evidencia que las empresas que han aplicado este modelo están comprobando que reutilizar los recursos resulta más rentable que crearlos desde cero, por lo que los precios de producción se reducen, ocasionando que los precios de venta también decrezcan, beneficiando de igual forma a los consumidores [8].

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se puede hablar de diez principios que rigen como debe funcionar la economía circular:

- **El residuo se convierte en recurso:** Consiste en la principal característica de la economía circular, donde todo el material biodegradable vuelve al medio ambiente y el no biodegradable se recicla.
- **El segundo uso:** Reintroducir en el círculo económico, como el de la figura 1, los productos que ya no se requieren en las necesidades iniciales del cliente.
- **La reutilización:** Consiste en reutilizar ciertos residuos o partes de éste, que aún puedan ser útiles para elaborar nuevos productos.
- **La reparación:** Consiste en proporcionar una segunda vida útil a productos desechados.
- **El reciclaje:** Utilizar los materiales encontrados en los residuos.
- **La valorización:** Aprovechar de la mejor manera los residuos que no son reciclables.
- **Economía de la funcionalidad:** Una propuesta de la economía circular consiste en eliminar la venta de productos e implementar un sistema de alquiler de bienes, de esta forma, cuando el producto termina su vida útil es devuelto a la empresa, la cual lo desmonta y reutiliza sus partes.
- **Energía de fuentes renovables:** Se eliminan los combustibles fósiles para la producción, reutilización y reciclaje.
- **La eco-concepción:** Se consideran los impactos medioambientales en el ciclo de vida del producto.
- **La ecología industrial y territorial:** Establece un modo de organización industrial en un territorio caracterizado por una gestión optimizada de los stocks y de los flujos de material, energía y servicios [8].

De igual forma, como cualquier otro método económico, la economía circular debe ser supervisada y medida mediante el uso de indicadores, los cuales proporcionan la información necesaria para determinar si este proceso se está realizando de forma eficiente y productiva. Los principales indicadores que se deben tener en cuenta son aquellos que miden la reducción, reutilización y reciclaje de los productos y sus derivados [10].

## II-F. Grafito

El grafito proviene de la palabra griega “graphein”, cuyo significado es “escribir”, la cual ha sido una de las funciones que tiene el grafito desde hace varios siglos, y fue hasta el

siglo XVIII que se demostró que el grafito es un alótropo del carbono. El grafito es un material muy interesante, debido a la gran variedad de materiales que se pueden obtener a partir de su forma básica, como por ejemplo fibras con alta resistencia, barreras herméticas y absorbedores de gas, entre otras [11].

El grafito por sí mismo, técnicamente, describe un ideal de material con una estructura de grafito perfecta y sin ningún defecto. También se utiliza para denominar de forma incorrecta a materiales de grafito, los cuales están compuestos o por carbonos grafilados, es decir, de materiales que consisten en carbono y que poseen la estructura del grafito, pero con múltiples defectos estructurales, o por “carbonos no grafilados”, los cuales consisten en materiales con átomos de carbono con las redes hexagonales planas de la estructura del grafito, pero con el orden cristalográfico siguiendo una dirección distinta a la dirección c o Z [11].

El grafito está compuesto principalmente de carbono (80-90%), donde el resto corresponde a impurezas inorgánicas de distinta naturaleza (sílice, alúmina, óxido férrico, etc.), teniendo como diferencia de otros compuestos de carbono el orden y la forma de la estructura cristalográfica, la cual corresponden más comúnmente a la estructura cristalográfica, la cual se puede observar en la figura 2. Como se observa, el grafito contiene planos paralelos apilados entre sí, con trigonales sp<sup>2</sup>. De la figura se tiene que los puntos negros corresponden a los átomos que poseen vecinos en todas las direcciones, incluyendo la dirección Z, y los puntos blancos corresponden a los átomos que no poseen conexión con los átomos de planos inferiores [11].

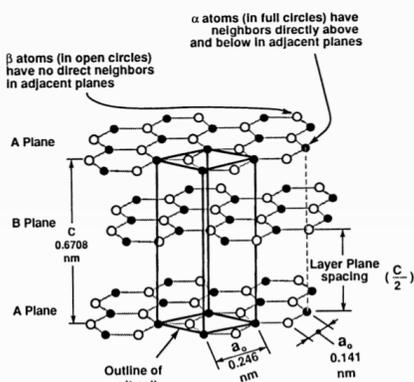


Figura 4. Estructura cristalográfica hexagonal [11].

También se pueden desarrollar grafitos sintéticos, de los cuales se obtiene que el grafito se divide en dos fases principales: la fase de material de relleno y la fase aglutinante.

En la figura 3 se evidencian las fases que poseen los compuestos de carbono en función de la presión y de la tempe-

ratura, encontrándose que el grafito se encuentra en un rango de 0-4500 K, y con una presión máxima de aproximadamente 150 kbares, determinando de esta forma el rango de trabajo del grafito.

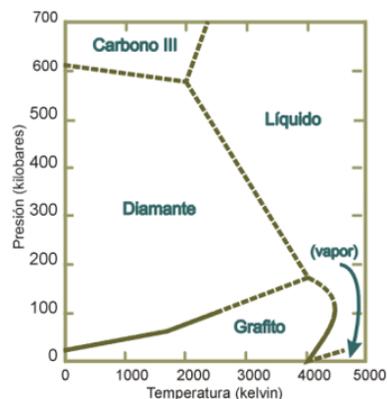


Figura 5. Diagrama de fases de un compuesto de carbono [13].

Las propiedades físicas del grafito se observan en el cuadro 4, donde es importante resaltar que para obtener medidas de propiedades físicas de materiales por encima de los 3000 K resulta muy complicado. Por este motivo se realizó una aproximación por medio de la toma de datos de un experimento de arco de carbono, obteniéndose las propiedades mencionadas [11].

Cuadro IV  
PROPIEDADES FÍSICAS DEL GRAFITO [11].

Forma Cristalina:	Hexagonal
Parámetros de celosía:	a <sub>0</sub> =0,246 nm c <sub>0</sub> =0,671 nm
Color:	Negro
Densidad a 300 K, 1 atm:	2,26 g/cm <sup>3</sup>
Volumen Atómico:	5,315 cm <sup>3</sup> /mol
Punto de sublimación a 1 atm (estimado):	4000 K
Punto triple (estimado):	4200 K
Punto de ebullición (estimado):	4560 K
Punto de fusión:	46,84 kJ/mol
Calor de vaporización a gas monoatómico:	716,9 kJ/mol
Electronegatividad:	2,5

El proceso de aproximación en el método experimental no es posible de aplicar para la obtención de las propiedades térmicas, pues las propiedades pueden variar considerablemente según el tamaño y la orientación de los cristales y otros factores relacionados con las condiciones de procesamiento. En el cuadro 5 se observan las propiedades térmicas.

En el cuadro 6 se observan algunas de las propiedades mecánicas del grafito de las direcciones mencionadas, las cuales corresponden a las observadas en la figura 4.

Cuadro V  
PROPIEDADES TÉRMICAS DEL GRAFITO [11].

Calor de combustión $\Delta h_{co}$ @ 25°C y presión constante para formar CO <sub>2</sub> , kJ/mol	393,13	
Entropía estándar S° a 25°C, J/mol*K	5,697-5,743	
Entropía $\Delta S_{298}$ , J/mol*K	152,3	
Entalpía $\Delta H_{298}$ , kJ/mol	716,88	
Calor específico @25°C, kJ/kg*K	0,690-0,719	
Conductividad termica @25°C, W/m*K	Dirección ab	398
	Dirección c	2,2

Cuadro VI  
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE ALGUNAS DIRECCIONES DEL GRAFITO [11].

C11 =	1060 Gpa (Dirección a)
C33 =	36,5 Gpa (Dirección c)
C44 =	4,5 Gpa (Paralela a los planos)

Por último, se muestran las propiedades químicas del grafito en los cuadros 7 y 8, evidenciando la reacción y el grado de resistencia que posee el grafito ante múltiples ataques químicos. El grafito puro es uno de los materiales químicamente más inertes. Es resistente a la mayoría de los ácidos, alcalinos y gases corrosivos. Sin embargo, las impurezas casi siempre están presentes en algún grado tanto en grafitos naturales como artificiales y a menudo tienen un efecto catalítico importante lo cual resulta en un aumento de la reactividad química [11].

En los cuadros 7 y 8 las letras A, B y C corresponden a la métrica de medida alto, medio y bajo, respectivamente.

## II-G. ¿Como se obtiene el grafito?

### ■ Natural

El grafito se forma cuando una roca carbonosa presenta metamorfismo de contacto, es decir cuando la misma se somete a calor y presión en zonas de la corteza terrestre o el manto superior, aproximadamente 52 MPa y temperaturas que se encuentran alrededor de los 750 °C, correspondiente a la fase metamórfica granulita, es decir el grafito pasa por un proceso de recristalización metamórfica y si la misma ocurre sobre capas de carbón o rocas con petróleo, surgen yacimientos de este mineral.

Se puede observar de otra manera en metamorfismo regional (también llamado grafito en escamas) y se produce por la transformación de lutitas y calizas en esquistos y gneis, que contienen pequeñas escamas de grafito.

Otra manera en la que ocurra su formación, es como mineral primario en rocas ígneas (magma solidificada) y condritas (meteoritos), que desarrollan partículas finas

Cuadro VII  
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL GRAFITO [11].

Químico	Resistencia al ataque químico
<b>Acidos y soluciones acidas</b>	
Mineral, no oxidante (HCl, HCN, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , HF)	A
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hirviendo	B
Mineral, oxidante (Br <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , HNO <sub>3</sub> , HClO <sub>4</sub> )	B
Sales inorgánicas, formas ácidas (alúmina, BF <sub>3</sub> , CuCl <sub>2</sub> , NiCl <sub>2</sub> , sulfatos)	A
Orgánico, fuerte (pH<3) (acético, carbólico, fórmico, maleico, oxálico, fenólico, pícrico, salicílico)	A
Orgánico, débil (pH 3-7) (adiabático, benzoico, cítrico, cresol, láctico, palmítico)	A
Sales orgánicas, formación ácida (alilo, cloruros de amilo, cloruros de etilo)	A
<b>Soluciones alcali y alcalinas</b>	
Mineral, no oxidante (hidroxidos, NaOH, hidracina, Mg fundido, KOH)	A
Mineral, oxidante (permanganato, perclorato, perboratos)	B
Sales inorgánicas, forma básica (BaSi <sub>2</sub> , borax, fosfatos, NH <sub>2</sub> O <sub>8</sub> , NaHSO <sub>2</sub> , NaPO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> S)	A
Orgánico, fuerte (pH>11) (aminas de etanol, piridina)	A
Bases orgánicas débiles (pH 7-11) (anilina, jabones, urea)	A
<b>Gases</b>	
Acidos (BF <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , HCl, HF, H <sub>2</sub> S)	A
Alcalinos (NH <sub>3</sub> húmedo, vapor a 300°C)	A
Anhidro (punto de rocío debajo de 0°C) (NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , etanol, F <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , HCl, HF, H <sub>2</sub> S, metanol, O <sub>2</sub> a 150°C, propano, SO <sub>2</sub> )	B
Líquida (aire, F <sub>2</sub> , He, H <sub>2</sub> , metanol, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> )	C
Oxidación (aire a 250°C, F <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> a 150°C, vapor a 300°C)	C
Reducción (acetileno, etanol, metanol)	A

Cuadro VIII  
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL GRAFITO [11].

Derretimiento	
Sales ácidas (AlCl <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> , FeCl <sub>3</sub> , PCl <sub>3</sub> , ZnCl <sub>2</sub> )	B
Sales alcalinas (Ba(OH) <sub>2</sub> , LiOH, KCN, soda ash)	B
Metales (Al, Sb, Babbitt, brass, Cu, Ga, Au, Mg, Hg, Ag, Sn, Zn)	A
Sales neutras (KCl, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	A
Sales oxidantes (nitrato de sodio)	B
Soluciones de sales, neutro (baking soda, KCr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , CuSO <sub>4</sub> , Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , KCl, agua de mar, aguas residuales, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	A
<b>Solventes</b>	
Alifática (butadieno, butano, butileno, ciclohexano, gasolina, aceite lubricante, propano, propileno)	A
Aromáticos (benzeno, coal tar, creosota, cumene, naftaleno, petróleo, estireno, uretano)	A
Clorinato, fluorinato, (CCl <sub>4</sub> , clorobenzeno, freones, cloroformo, cloruro de metilo, cloruro de vinilo)	A
Oxigenados, sulfato (acetaldeido, acroleína, butilacetato, butil alcohol, CS <sub>2</sub> , seda artificial, eter, etil acetato, furfural, glicerina, metanol, cetonas, sorbitol, vinil acetato)	A
A=alto, B=medio, C=bajo	

principalmente.

El grafito natural está constituido en su mayoría por carbono hasta en un 90 %, con algunas impurezas inorgánicas que pueden eliminarse. Sin embargo, sus propiedades dependen mucho de la región de donde este sea extraído.

#### ■ *Sintético*

La manera mas usual y sencilla de obtener grafito sintético es mediante la fundición de elementos amorfos de carbón que se usan a nivel industrial, como lo son el coque de petróleo o el alquitrán, a temperaturas de entre 2500 a 3000 °C. Los compuestos volátiles como lo son óxidos de metal, azufre, nitrógeno, hidrógeno y todos los componentes orgánicos serán consumidos y las sustancia resultante tendrá una composición del 99 % de pureza de carbono.

En Colombia no existe minería de grafito y el que se necesita se importa. Existen manifestaciones del mineral en algunas regiones del país y en este trabajo se recomienda incentivar y estimular la exploración y explotación de grafito en el área de la Cordillera Central, región que ofrece las mejores perspectivas de su existencia.

### *II-H. Formas del grafito*

Los tipos de grafito existentes se pueden determinar mediante su obtención, es decir si esta es sintética o natural:

#### ■ *Formas naturales del grafito.*

##### ■ *Cristalino:*

- *Escamoso:* Son láminas que están separadas en rocas metamórficas como el mármol, neis, esquisto, cuarzo, cuarcita con feldespatos o mica. Depende de su ubicación y las condiciones en la que se encuentre se pueden encontrar variaciones en dureza, grosor, densidad y forma.



Figura 6. Grafito en forma de escama.

- *Veta:* Se localiza en forma de vetas hidrotermales o apilado a lo largo de las superficies de contacto entre pegmatitas y calizas. Las vetas varían en dimensión desde unos cuantos milímetros a más de 2 metros.
- *Amorfo:* Se encuentra en forma de partículas microcristalinas también formadas por metamorfismo

distribuidas en rocas metamórficas tales como pizarras y filitas.



Figura 7. Grafito amorfo.

#### ■ *Formas sintéticas del grafito*

- *Grafito isotrópico:* Es generado por la mezcla de coque de petróleo y un aglomerante a baja temperatura; dichos elementos se funden, se prensan, se carbonizan y se grafitizan (Figura 8).



Figura 8. Grafito isotrópico.

- *Grafito pirolítico:* Este tipo de grafito se obtiene a través del depósito de carbono a temperaturas superiores a los 1800 °C o por tratamiento térmico de grafitización (Figura 9).

### *II-I. Grafito y la industria*

El grafito tiene una alta utilidad en distintos tipos de industria. Depende de sus requerimientos, el grafito se puede utilizar tanto de forma directa ya sea en formas naturales posteriores a un proceso de limpieza o de forma sintética. Sin embargo para aplicaciones más especiales se utiliza el grafito cuando se hacen transformaciones del mismo para así concluir en la creación de alotropos de carbono como lo son:



Figura 9. Grafito pirolítico.

#### ■ Fibras de grafito

Las fibras de grafito poseen una combinación de baja densidad, alta resistencia (clasifican por su módulo elástico, que va de 35 hasta 800 GPa: módulo bajo, intermedio, alto y muy alto. Las resistencias a la tensión van de 250 a 2600 MPa) y alta rigidez; el producto se conoce como plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP). Todas las fibras de grafito se producen mediante la pirólisis de precursores orgánicos, comúnmente el poliácilonitrilo (PAN) o pueden utilizarse el rayón y la brea (residuo de los alambiques desintegradores en la refinación de petróleo). Con el PAN, las fibras se entrecruzan parcialmente a una temperatura moderada (para evitar su fusión en pasos posteriores del procesamiento) y se estiran al mismo tiempo. En este punto, las fibras son carburizadas; éstas se exponen a temperatura elevada para que expelan el hidrógeno (deshidrogenación) y el nitrógeno (desnitrogenación) del PAN. Las temperaturas para carburar van hasta 1500 °C aproximadamente, y para grafitizar hasta 3000 °C. Las fibras de grafito tienen por lo común más de 99 % de carbono.

-Fibras conductoras de grafito: Son incorporados en los plásticos reforzados con el fin de que los mismos mejoren la conductividad eléctrica y térmica. Las fibras conductoras están disponibles en segmentos o en formas continuas y se incorporan directamente en las piezas de plástico moldeadas por inyección. Las aplicaciones incluyen blindaje electromagnético y de radiofrecuencia y protección contra descargas eléctricas.

#### ■ Nanotubos de carbono (NTC)

Existen diferentes tipos de NTC en función con las capas que tienen de grafito y la configuración que se tiene entre las mismas, estos tipos pueden ser de pared sencilla (NTCPS) y nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM).



Figura 10. Fibras de carbono

La estructura de NTCPS consiste de un cilindro hueco que resulta al enrollarse una lámina de átomos de carbono con un patrón hexagonal similar al grafito (grafeno) sobre sí misma, estos átomos se encuentran covalentemente enlazados a tres átomos de carbono vecinos mediante una hibridación  $Sp^2$ , quedando el cuarto enlace del carbono sin una localización fija ni enlace alguno entre los demás átomos. Sus dimensiones son un átomo de grosor, pueden llegar a ser mas o menos docenas de átomos de circunferencia, su diámetro varía entre 1.4-2 nm con longitudes de hasta 100 micras.

La estructura de NTCPM consiste en capas de láminas de grafito enrolladas sobre si mismas, donde es necesario la superposición de más de un "tubo", la cual se hace concéntricamente con un espacio entre las laminas de aproximadamente 0.36 nm, con un diámetro externo de 10 a 50 nm, donde cada átomo de carbono está unido con otros tres mediante hibridación  $Sp^2$  (donde pasa de una combinación de dos orbitales a uno de 3). El cuarto enlace de carbono forma enlaces débiles del tipo de Van der Waals con las demás hojas de grafito; la estructura cristalina se pierde a medida que el número de hojas de grafito aumenta en la estructura.

Este tipo de estructura es especialmente importante y usado en aplicaciones recientemente desarrolladas en distintos tipos de industria, pues tiene múltiples localizaciones en sus estructura (especialmente cuando se realizan modificaciones), ya que puede albergar diferentes elementos e inclusive diferentes tipos de sustancias.

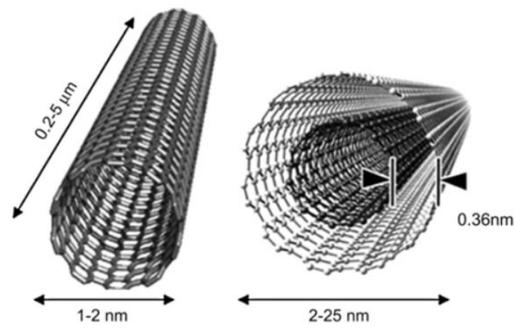


Figura 11. NTCPS Y NTCPM

### ■ *Nanoespuma de carbono.*

Este alótopo es producido en forma de 'racimos' y se pueden fabricar mediante ablación con láser de alta frecuencia de repetición (10 kHz - 100 MHz) y baja energía del orden de los  $\mu\text{J}$ ; en un gas inerte, a estas condiciones estos desarrollan vapores de carbono. El gas inerte se calienta desde la temperatura ambiente con el carbono atomizado. En condiciones óptimas, el gas inerte no pierde su energía calorífica, la temperatura se mantiene entre el o los distintos ciclos de formación. Después del primer ciclo de formación de la 'base', los siguientes se llevan a cabo a temperaturas por encima de la temperatura estimada de formación y así se inicia la unión  $\text{Sp}^2$ . El aumento de densidad y temperatura promueve condiciones favorables para la formación de racimos carbonosos. La formación resultante no se encuentra en equilibrio.

La estructura de esta consiste en un conjunto de átomos de carbono unidos en una red tridimensional (racimos). La estructura de enlace de tipo fractal consta de grafito con enlaces  $\text{Sp}^2$  agrupados y a su vez estos grupos conectados por enlaces  $\text{Sp}^3$ . Cada grupo tiene aproximadamente 6 nanómetros de ancho y contiene alrededor de 4000 átomos de carbono unidos donde la unión entre ellos da como resultado una especie de curvatura cóncava mediante la inclusión de heptágonos distribuidos entre el patrón hexagonal (ya que este es similar al patrón formado con grafito). Los enlaces  $\text{Sp}^3$  se encuentran principalmente en la superficie de la estructura y constituyen entre el 15% y el 45% del material. El material, que es ligero, con una densidad de  $2\text{E}-8 \text{ Kg} / \text{cm}^3$ , es usado en aplicaciones magnéticas ya que la nanoespuma es atraída por los imanes, y por debajo de  $-183^\circ\text{C}$  puede hacerse magnética.

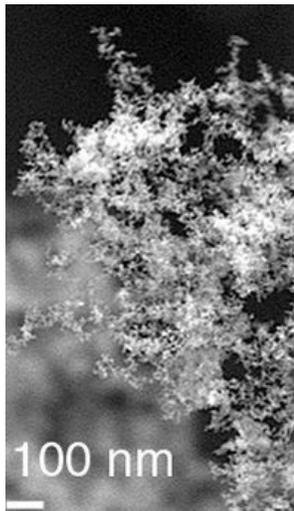


Figura 12. Espumas de carbono.

## II-J. Aplicaciones del grafito

### ■ *Procesos de fabricación con grafito.*

Se sabe que la forma del grafito cambia según diferentes factores. El más significativo dentro de la industria es el que

se determina según su origen. Dependiendo de este mismo se determina su utilidad en diferentes procesos.

### ♣ Aplicaciones del grafito natural

#### ■ *Recubrimientos*

-Lubricantes y aceites

La maquinaria puede obtener lubricación de materiales tanto líquidos como sólidos. Dentro de los materiales sólidos para lubricación se pueden encontrar el grafito. Este tipo de lubricante se denomina "Seco de Grafito" (CRC). Su forma de actuar es su adhesión al metal, goma, plástico y la mayoría de los sustratos para formar una barrera repelente de suciedad que lubrica y protege las superficies de presión y fricción, un ejemplo para este caso es su típico uso en recubrimientos para frenos y clutch.

Es ideal para aplicaciones donde productos de petróleo deben ser evitados, ya sea por altas temperaturas que soporta la maquinaria (hasta  $450^\circ\text{C}$ ) o porque se encuentre en contacto constante con agua o químicos.

Algunas otras inclusiones de recubrimiento en materiales son como recubrimiento de tubos de televisión (a forma de elemento conductor), de sustancias explosivas, de fundición del hierro y acero como un 'aditivo' para incrementar las propiedades de los mismos.

#### ■ *Industria de la energía eléctrica*

-Material conductor: Su calidad de auto lubricación es el indicado para aplicaciones que requieran movimientos cíclicos por ejemplo en la fabricación de conductores en motores eléctricos y otros equipos eléctricos para aviones (como por ejemplo el "buckypaper", material innovador que usa nanotubos). La manera de crear un material superconductor con el grafito es mediante la inclusión de átomos de calcio entre las láminas de la estructura hexagonal del mismo obteniendo ( $\text{CaC}_6$ ) que es superconductor. El nuevo material se torna superconductor desde  $-261.65^\circ\text{C}$  en adelante. Este tipo de materiales innovadores se determinan por ser un compuesto de grafito intercalado, una nueva clase de materiales electrónicos que consisten en intercalar átomos pertenecientes a la familia de los metales como lo son calcio, sodio o potasio entre las capas del grafito. Otro material muy conocido es el de tipo superconductor para el cual se emplea grafito pirolítico el cual se lleva a una temperatura de  $350^\circ\text{C}$  junto con una aleación fundida de litio-calcio en una atmósfera de argón.

-Generación de energía: En las pilas secas (que en lugar de almacenar energía generan la electricidad mediante una reacción en su interior) el grafito es incluido sobre del dióxido de manganeso para que genere una unión superficial y de esta manera mejorar la conductividad. Este a su vez funciona como material absorbente. Por lo general son usadas en baterías secas de tipo zinc-carbono, sin embargo se puede

incorporar en baterías recargables y alcalinas.

Una aplicación novedosa desarrollada para aplicaciones en baterías, es el desarrollo de grafito alineado, el cual duplica la eficiencia de las baterías de los coches eléctricos. Los prototipos de las celdas de baterías de litio fabricados por la empresa Batttrion han demostrado aumentar la tasa de descarga en un 40% y la velocidad de recarga en un 50% batería de un vehículo eléctrico, sin afectar vida útil de la batería. Otro efecto importante debido a las mejoras mencionadas anteriormente es aumentando su seguridad debido a la mejora en la 'refrigeración' de las mismas.

#### ♣ Aplicaciones del grafito sintético

##### ■ *Moldes*

-Moldes de arena: Donde se necesita un separador de molde usualmente se usa un talco especial no reactivo, pero por la volatilidad y el tamaño de las partículas del mismo es nocivo para la salud. Para uso industrial en procesos automatizados, la superficie del molde se rocía con productos químicos, suspendidos o disueltos en alcohol isopropílico, que después se queman para que el compuesto, por lo general un tipo de grafito, recubra el molde, a fin de conseguir una pieza fundida con un acabado superficial de mejor calidad.

-Moldes permanentes: Donde se hace uso del grafito compactado, estos moldes se empaquetan como los de arena, se secan con aire, se hornean a 175 °C, se calientan a 870 °C y después se almacenan a una humedad y temperatura controladas. Los procedimientos de fundición son similares a los de los moldes de arena. Las principales aplicaciones de este tipo de moldes son aplicaciones para soldaduras aluminotérmicas de múltiples tipos de conexiones eléctricas o para fundiciones de metales reactivos, como titanio y zirconio.

##### ■ *Lubricantes y aceites*

Como ya se menciona, la maquinaria puede obtener lubricación de materiales tanto líquidos como sólidos y en el grafito se pueden utilizar materiales sólidos útiles como lubricantes. Un ejemplo, como se menciona anteriormente, es el "Seco de Grafito"(CRC), el cual protege contra presión y fricción mediante una barrera repelente de suciedad debido a su propiedad de adhesión.

##### ■ *Recubrimiento electrolítico*

El recubrimiento electrolítico es un proceso químico o electroquímico consistente en aplicar una capa metálica al producto, para poder mejorar sus propiedades de resistencia a la corrosión o al desgaste, o simplemente para mejorar su apariencia.

En la electroconformación, un proceso estrechamente relacionado con el recubrimiento electrolítico, objetos moldeados, por ejemplo, en yeso o plástico, se hacen conductores mediante la aplicación de grafito y después

se conectan como cátodo para que el metal se deposite sobre ellos. Esto se logra porque el electrodo en lugar de estar construido de materiales metálicos como cobre, tungsteno, latón, y acero, está hecho de grafito. Los métodos de fabricación de electrodos incluyen estampado, extrusión, mecanizado, y electroerosión por hilo, entre otros. También se emplean tecnologías de Rapid tooling para obtener electrodos, y éstas se clasifican en directas o indirectas. Atendiendo al mismo criterio, dichos electrodos pueden llegar a ser de 750 mm (30 pulgadas) de diámetro y de 1.5 m a 2.5 m (5 a 8 pies) de largo.

##### ■ *Cemento de grafito*

El cemento de grafito es un material pastoso que une el grafito. Dicha unión es 100% carbonosa. Es estable hasta temperaturas de 2700 °C en atmósferas inertes. Debe pasar por un proceso de aplicación de limpieza y curado para poderse realizar la unión de dichos elementos. Una vez que las piezas unidas pasan por un ciclo de calor completo, la unión cementada es aproximadamente 99% de carbono puro. Si el proceso de unión se realiza de manera correcta, juntas resultantes suelen ser más fuertes que el sustrato. Entre las principales aplicaciones de este elemento están la unión de ladrillos de carbono, fabricación de estructuras de grafito monolítico, reparación de bandejas, matrices, plantillas y accesorios agrietados. También se puede usar para asegurar las tapas de las cápsulas, parchear agujeros y arreglar desconchados y rayones. El cemento de grafito incluso se puede utilizar para unir mirillas y picos de vertido, colocar moldes y matrices, sellar taponos, reparar subsectores, unir espuma de carbono y fieltro y reparar elementos calefactores de resistencia rotos.

#### *II-K. Grafito y medio ambiente*

Hoy en día la necesidad de minimizar residuos, así como su disposición correcta, segura y amigable con el medio ambiente, es un aspecto necesario y requerido a nivel mundial. Este hecho ha incurrido en una evolución de propuestas y/o alternativas tecnológicas para el manejo en especial de residuos no peligrosos y estables para su correcta disposición y/o reaprovechamiento.

Una de las principales y más comunes aplicaciones del grafito a nivel industrial, como por ejemplo en la industria metalúrgica o de cerámicos es la fabricación de moldes, al realizarse la limpieza de los mismos, el lodo resultante de esta limpieza contiene diferentes tipos de componentes, uno de los más importantes es el grafito, el cual puede ser incorporado dentro de algunos procesos.

En Colombia el manejo de aguas residuales es cuidadoso, pero las empresas desaprovechan el uso de ciertos componentes, perdiendo tanto oportunidades de mejora en procesos de producción como de aumentar sus recursos económicos. Se podría decir que es un problema general y

concurrente en muchas empresas ya que como el enfoque de las mismas es producir de manera eficiente y rápida, lo mas coherente sería deshacerse de la mejor manera y mas acelerada de los residuos no permitiendo ver las oportunidades que hay en estos residuos. Por lo tanto, fabricantes de piezas cerámicas o metálicas (en especial de aluminio) no suelen tener un sistema de tratamiento de lodos. Además no existen datos exactos sobre la cantidad o tipos de lodos generados a nivel regional y a nivel industrial tienen poco control sobre datos específicos en cuanto a su disposición. Inclusive se puede incurrir a un almacenamiento descuidado, el cual es un problema ya que los lodos residuales industriales deben disponerse de forma ambientalmente segura, dado que a pesar de que el manejo residual cuenta con los procedimientos necesarios para separar algunos elementos del lodo, se debe ser cuidadoso y se incurre a más gasto si éste no es inerte. Esta razón es mas que suficiente para asegurar una buena caracterización y procedimientos adecuados con los lodos.

## II-L. Lodos industriales

Hace parte de la subdivisión de una de las 3 clasificaciones de lodos, el cual indica su medio de obtención. En este caso los lodos industriales son muy importantes debido a que según las aplicaciones anteriormente expuestas y en conjunto con el enfoque de aplicabilidad del grafito debido a su reutilización, es importante hablar de los lodos y el proceso mediante el cual se determina el aprovechamiento de metales o sólidos pesados. Esto hace parte del proceso de estabilización del mismo lodo. Los contaminantes que estén presentes en las aguas residuales pasan a las plantas de tratamiento donde son eliminados mediante un tratamiento fisicoquímico o biológico, lo cual da como resultado un lodo. El mismo que debe someterse a un análisis CRETIB, lo que permitirá conocer si el lodo es considerado como un residuo peligroso o como un residuo no peligroso (Ley 10/1998). Con base en sus características físico-químicas, se plantea un manejo como el que se puede observar en la figura 13.

## II-M. Clasificación de lodos industriales

- Dependiendo de la etapa del agua residual del que se haya generado

- Lodos primarios** El lodo primario es producido durante los procesos de tratamiento primarios de las aguas residuales, es decir, después de las pantallas y desarenado, y posee productos no disueltos de las aguas residuales. Este lodo después de pasar por su primer 'tamizado' se dispone en un tanque de sedimentación, el lodo que queda en el fondo de dicho tanque se denomina lodo primario. La composición del lodo depende de las características del área y de las condiciones mediante la cual fue obtenida esta o estas aguas residuales. La consistencia se caracteriza por ser un fluido denso con un porcentaje en agua que varía entre 93 % al 97 %.

- Lodos secundarios** Cuando las partículas o biomasa son eliminadas para evitar el riesgo biológico de un lodo, este alcanza una fase biológicamente estable, y se ha pasado ya por la segunda fase en la cual dichos patógenos son tratados ya sea de forma química, térmica o ambas. El lodo secundario es rico en lodo activo, el cual es un sistema usado dentro del proceso de tratamiento de aguas residuales que se trata básicamente en la incorporación de microorganismos dentro del mismo lodo (bacterias heterómeras facultativas), que crecen en el agua residual, convirtiendo la materia orgánica disuelta en productos más simples como nuevas bacterias, dióxido de carbono y agua. Es un tratamiento secundario o biológico en una estación depuradora de aguas residuales y es el comúnmente más utilizado tanto municipal como industrialmente.
- Lodos mixtos** Es la combinación de lodo primario y secundario
- Lodos terciarios** Es obtenido a través de procesos de tratamiento posteriores, con adición de agentes flocculantes, los cuales proveen o facilitan los enlaces entre las partículas lo que genera nuevos componentes mas fáciles de eliminar y otros que sirven en la estabilización del mismo.

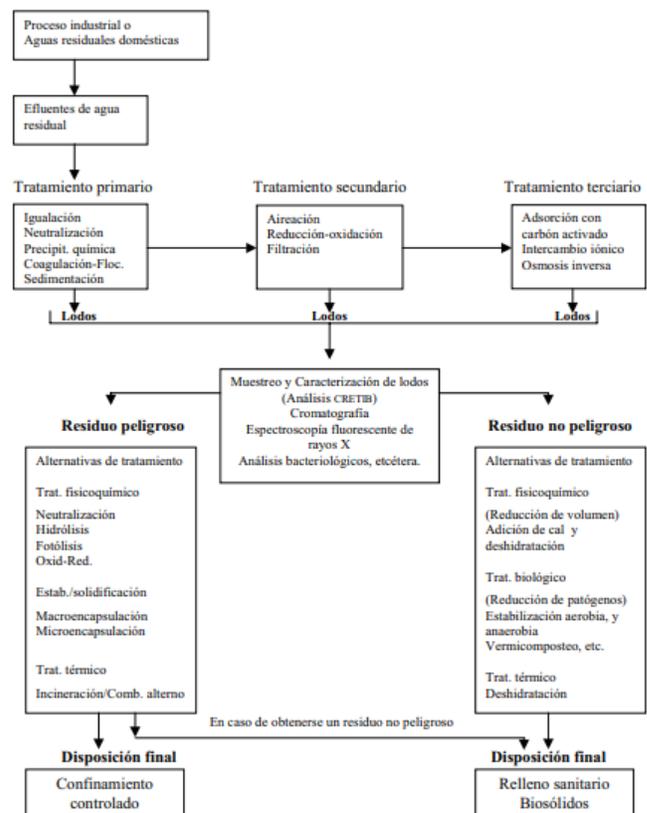


Figura 13. Alternativas planteadas para tratamiento y disposición de lodos. [18]

### ♣ Tratamientos de lodos industriales

El paso esencial para el tratamiento, disposición e inclusive el paso de reutilización es el de lograr la estabilización de los lodos residuales. En la figura 14 se puede observar un esquema propuesto por Dégremont para el tratamiento de los mismos.

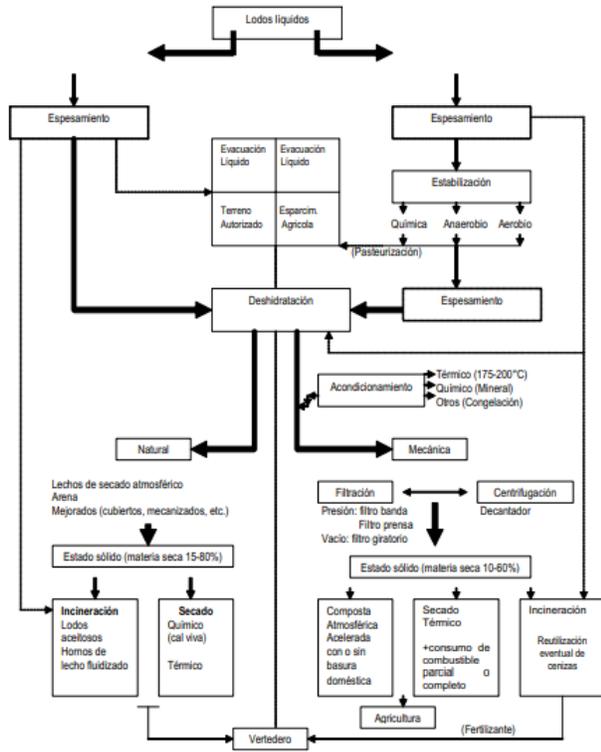


Figura 14. Líneas más comunes en el tratamiento de lodos. [19]

### ♣ Proceso

En países de regiones como Norte América y Europa, que tienen mayor avance en la industria y mayor rigurosidad en las normas ambientales que regulan, la selección de alguno de estos procesos para la estabilización de un lodo depende de ciertos factores, como lo son: calidad y cantidad de lodos, la industria y/o el entorno mediante el cual fue obtenido y los recursos económicos que tenga la empresa que desea realizar su estabilización. El proceso para consolidar la reutilización del lodo requiere por lo general la inversión de mucho dinero pues la infraestructura y los recursos requeridos para la misma son especiales, sin embargo, la inversión en el proceso soluciona problemas asociados a contaminación e incorpora nutrientes necesarios para reciclar elementos vitales en los ciclos biológicos naturales; además de convertir un residuo peligroso en un recurso aprovechable.

Existen distintos métodos mediante los cuales se estabilizan los lodos industriales, entendiéndose por estabilizar la manera en que estos se convierten en no reactivos y contempla los procesos físicos, químicos, térmicos y biológicos. De manera

en que estos se desenvuelvan en los diferentes niveles de tratamiento (primario, secundario y terciario) de la siguiente manera: reducción biológica del contenido de materia volátil, la oxidación química de la materia volátil y la adición de elementos químicos cuyo objetivo es transformar al lodo de manera que no sea óptimo para el albergue y/o propagación de microorganismos. Por último, estaría la aplicación de calor para la desinfección o esterilización del lodo.

Dentro de los diferentes tipos de tratamientos de lodos se encuentra la estabilización química y/o reactiva, y la física. En este caso se hablará de todas, sin embargo, vale mencionar que en la industria son de gran importancia los procesos de reactividad y reutilización.

Las técnicas más utilizadas para la estabilización de los lodos son: la digestión aerobia, la digestión anaerobia, la estabilización con cal, el tratamiento térmico; y, el compostaje.

Una clasificación importante para entender las distintas técnicas de tratamiento de lodos es el de las líneas, que son usadas para su obtención, en los cuales se puede obtener los siguientes tipos de lodos:

1. *Lodos espesados*
2. *Lodos estabilizados*
3. *Lodos deshidratados*

### II-N. Espesamiento

Donde la importancia que destaca es en la reducción del volumen del lodo, de manera en que se elimina agua y aumenta la concentración de sólidos por unidad de volumen. El objetivo principal es el incremento de la eficacia y la optimización económica de los procesos posteriores. En los procesos de espesamiento los principales medios son:

1. *Espesamiento por gravedad:* En el cual emplea se emplea la fuerza de la gravedad. La entrada del lodo se realiza por la zona central del tanque y en la parte inferior se recogen los lodos espesados y en la superior queda el producto sobrante. Este sistema se emplea en lodos primarios, físico-químicos y mixtos que decantan bien por gravedad. Los lodos biológicos decantan lento y no completo por la presencia de microorganismos patógenos.
2. *Espesamiento por flotación:* Es un método opuesto al espesamiento por gravedad en el que el lodo se localiza en la parte superior. Por la unión de pequeñas burbujas, generalmente de aire, los sólidos en suspensión, finalmente son menos densos que el agua. Este tipo de sistema está indicado para el espesado de fangos biológicos debido a su baja capacidad de sedimentación.
3. *Espesamiento mecánico:* La concentración de lodo se lleva a cabo aumentando las fuerzas gravitacionales.

- Fuerza centrífuga: En la cual se acelera la decantación o la sedimentación de las fases del lodo (sólida y una líquida), según su densidad. Se emplea principalmente en lodos biológicos. Suelen requerir el uso de equipos caros que requieren medidas adecuadas de mantenimiento.
- Tambor rotativo: Separación por filtración. Se emplea en caso de lodos biológicos. Los costes de intervención no son elevados, requieren de poco espacio y no producen olores.
- Mesa espesadora: En este caso la separación ocurre por drenaje del agua a través de una cinta horizontal porosa en movimiento. Están indicadas para lodos activos o digeridos. No es adecuado en el caso de lodos físico-químicos.

## II-Ñ. Estabilización

- *Digestión anaerobia*: Comprende dos fases, en la primera se forman ácidos volátiles y en la segunda las bacterias anaerobias producen gas metano a partir de dichos ácidos, todo esto en ausencia de oxígeno molecular. Los digestores anaerobios de lodos comúnmente operan a temperaturas mesofílicas (35 °C), y puede llegar a subir hasta temperaturas termofílicas de hasta 55 °C. Con este proceso se obtienen ventajas como lo son: la separación de la fase sólida de la líquida, incremento de la degradación de sólidos orgánicos, eliminación de microorganismos patógenos y reducción de hasta un 56 % en los SSV (Roberts y col., 1999).

Sin embargo, por medio de este tipo de digestión se observa una limitada tasa de hidrólisis de la materia orgánica y mínima biodisponibilidad de materiales orgánicos solubles. En digestores mesofílicos o termofílicos se requiere de tiempos de retención de sólidos mayores a 20 días. Por lo tanto para favorecer la digestión se complementa mediante métodos físicos como lo son: térmico, mecánico, ultrasonido o hidrotérmico.

En los reactores anaerobios de una sola fase todas las etapas de la digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) se llevan a cabo en un mismo ambiente [21]. Hacer todos los procesos en un mismo paso no es lo más aconsejable, pues los procesos metabólicos de las bacterias acidogénicas y de las metanogénicas, bajo condiciones ambientales que incrementan la proliferación de las bacterias productoras de metano, suelen retardar el metabolismo de las poblaciones acidogénicas. Puede en una misma planta pero mediante diferentes procesos, producirse una misma mezcla para la estabilización de lodos primarios y secundarios, estos son reactores alimentados con flujo ascendente y separando las fases gas-líquido-sólido mediante un sistema colocado, el cual permite la salida

del biogás producto de este proceso, pero limitando la salida del material en suspensión.

- *Digestión aerobia* Proceso biológico que mediante acción microbiológica (principalmente bacterias y protozoos), en el que se oxidan otros microorganismos mediante un aporte de oxígeno en los digestores abiertos, reduce el total de lodos que se deben evacuar posteriormente. De este modo se adecua el material a procesos posteriores.

Se emplea como tratamiento secundario de una EDAR (estación depuradora de aguas residuales) sin tratamiento primario. También puede emplearse para lodos mixtos con un aporte más elevado de oxígeno. Los factores que afectan a este proceso son:

- Tiempo de retención.
- Temperatura.
- Necesidades de oxígeno y de mezcla.

- *Tratamiento químico* El tratamiento químico a lodos residuales se lleva a cabo para mejorar la capacidad del lodo a perder el agua, ya que los químicos utilizados cambian las características fisicoquímicas del lodo, favoreciendo la eliminación de coloides y del material más disperso. Los químicos más utilizados corresponden a sales de hierro y aluminio que actúan como agentes precipitantes con cal para disminuir el contenido de microorganismos patógenos [21]. Los principales tratamientos que se realizan son:

- Estabilización con Cal: El producto que se aplica más frecuentemente es la cal, esta se añade al lodo en la dosis adecuada para mantener el pH en 12 durante el tiempo suficiente (mínimo 2 h) para eliminar o reducir los microorganismos patógenos y los responsables de los olores. Este sistema suele emplear depuradores o sistemas complementarios de estabilización. Normalmente se incorpora antes del secado de los lodos, aunque también puede emplearse posteriormente, empleando menores cantidades de cal, cuya dosificación depende del tipo del lodo, su composición química y su concentración [22].
- Oxidación con cloro: Se incorpora una dosis alta de cloro al lodo a tratar llevándose a cabo en reactores cerrados y con periodos de retención cortos. Por ahora este sistema no está extendido a nivel industrial [22].

- *Incineración* El proceso de incineración tiene como finalidad realizar un proceso de combustión a las materias orgánicas de los lodos, realizando un proceso de secado inicial para posteriormente realizar el proceso de combustión. Los incineradores comúnmente utilizados están diseñados para realizar la combustión con un 75 % de humedad en los lodos. El proceso que sigue este proceso es el siguiente:

- Se eleva la temperatura del lodo a 100 °C.
- Comienza el proceso de evaporación del agua contenida en el lodo.
- Se eleva la temperatura del vapor y del gas.
- La temperatura continúa elevándose hasta el punto de ignición de los sólidos secos.

## II-O. Reutilización y aprovechamiento de grafito

Los lodos obtenidos por la empresa Corona se caracterizan por tener altas concentraciones de grafito. Por lo tanto, se identificaron tres alternativas que permiten la reutilización del lodo, estabilizando los parámetros analizados, para que se cumpla la Resolución 1207 de 2014.

Mediante la transformación y la separación de residuos sólidos del lodo, se pueden encontrar diferentes formas de reaprovechamiento del grafito dentro del mismo. Algunas de las formas en que se puede aplicar esta reutilización son:

- **Electrocoagulación:** Esta alternativa tiene las siguientes operaciones: control de pH, electrocoagulación, sedimentación y filtración. Donde principalmente se rescatan metales como aluminio y hierro, este último de gran importancia pues cuando el hierro se impregna de grafito. Estas operaciones se pueden ver en la figura 15. Esta alternativa requiere que el lodo ya estabilizado se encuentre en un valor de pH cercano a 7 para que se presente una mejor remoción de contaminantes, luego se utiliza un método electroquímico para eliminar por medio de corriente eléctrica y electrodos metálicos las sustancias disueltas en el agua, produciéndose reacciones químicas que alteran la forma de los contaminantes, y obteniendo así partículas sólidas (flóculos) de fácil remoción por medio de la sedimentación y filtración. Su aprovechamiento final después de este procedimiento es en la incorporación de grafito en la elaboración de fundición de grafito compacto, la cual reúne ciertas propiedades mecánicas de importancia como lo son elasticidad, resistencia y conductividad térmica con valores intermedios entre la fundición grafitica esferoidal y laminar.

La elaboración de esta fundición se realiza de manera similar a la obtención de hierro nodular: se introduce Mg o Ce como elemento esferoidizante y se puede incorporar algún elemento degenerador de grafito, como Ti o S.

- **La Ósmosis inversa alternativa se constituye de las siguientes operaciones:** un pretratamiento que incluye: ajuste de pH, filtración por arena, filtración con carbón activado, un suavizador, y luego la ósmosis inversa como se puede ver en la figura 16.

El tratamiento previo evita incrustaciones y agentes de ensuciamiento, realizando una filtración y utilizando in-



Figura 15. Proceso de electrocoagulación [31].

hibidores de incrustaciones, ácidos o ablandamiento. La remoción de metales como el cromo, el hierro, cobre, cobalto, aluminio, entre otros, es mayor del 93 % utilizando el proceso de ósmosis inversa utilizado en el artículo de H.Kirk Johnston en 1975 [32]. El grafito puede incorporarse dentro del mismo procedimiento de ósmosis, ya que las partículas se pueden incorporar al filtro de carbón activado.

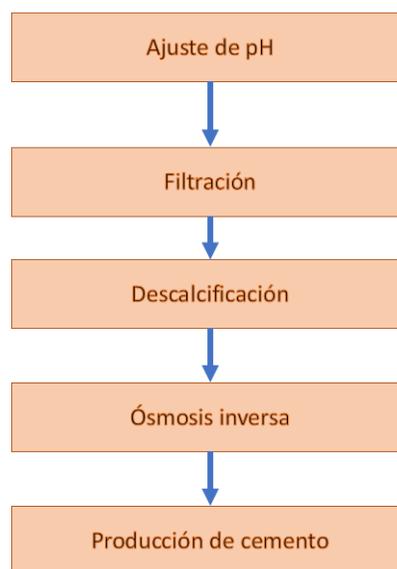


Figura 16. Proceso de ósmosis inversa [31].

Cabe aclarar que con cualquiera de los dos métodos, si el principal componente es el grafito, la obtención de este cerámico puede incorporarse después de comprobar que químicamente no sea reactivo en cualquiera de las

posibles aplicaciones del producto y dependiendo del tipo de grafito obtenido en este tipo de casos sintéticos.

- *La ceniza de lodos de depuradora:* es el subproducto producido durante la combustión de lodos que han sido usados en depuración, en el proceso en que ya han sido deshidratados dado el proceso de incineración. Las cenizas de los lodos de depuradora son principalmente material con algunas partículas del tamaño de la arena [0.063-2 mm].

Las propiedades de las cenizas de los lodos dependen del tipo de incineración y los aditivos químicos introducidos en el proceso del tratamiento de aguas residuales.

Este tipo de lodos se usa de manera directa en la producción de energía, donde sirve para la incineración de combustibles y se puede reutilizar el desecho sólido. En múltiples ocasiones el valor del lodo y su contenido de humedad son insuficientes para soportar la combustión.

La incineración de lodos de depuradora (deshidratados a aproximadamente un 20 % de sólidos) reduce el peso de los lodos de alimentación que requieren eliminación en aproximadamente un 85 %.

### III. CONCLUSIONES

De acuerdo a la investigación realizada, se encontró que las estructuras básicas de grafito están complementadas con otras, estructuras llamadas carbino, que, a pesar de ser poco frecuentes e incluso de difícil obtención debido a los procesos para formar dichas estructuras, logran posicionarse como las estructuras predominantes en avances tecnológicos e industriales. Al observar las diferentes aplicaciones en las que éstos se pueden utilizar, se evidencia que se requiere un nivel diferente de desarrollo en la estructura de la organización, por lo tanto, esto genera una oportunidad en la industria mundial del grafito permitiendo su continua investigación e implementación en diferentes procesos.

Observando los avances en la tecnología térmica y las técnicas que permiten la producción de polvos de grafito de mayor pureza, se evidencia un potencial desarrollo que conducirá a nuevas aplicaciones para el grafito en los campos de alta tecnología. Tales técnicas de refinación innovadoras han permitido el uso de grafito mejorado en compuestos de carbono-grafito, electrónica, láminas, materiales de fricción y aplicaciones especiales de lubricantes. Adicionalmente, se observa su aplicación en el campo de los cerámicos, principalmente como revestimiento de hornos, donde el grafito podría ser la mejor opción debido a su relación costo/durabilidad y sus propiedades de alta resistencia, características que lo posicionan como un potencial sustituto del coque molido con olivino, el material utilizado actualmente

en este campo.

En la fabricación de piezas cerámicas se hallaron dos oportunidades de aplicación de la reutilización del grafito, la primera es como partícula en suspensión que haga parte del engobe y la segunda es como polvo seco aplicado sobre las piezas después del proceso de bruñido. Estas aplicaciones influyen directamente en la pieza mejorando las propiedades aislantes y de refractario.

Sin embargo, son aún reducidas las formas en que este podría ser útil para mejorar el proceso, debido a que se necesita de un proceso previo para el tratamiento del grafito, ya sea la transformación a su presentación en forma laminar (graphoil), el cual es una solución para una aplicación de forma prácticamente directa, o añadirlo como un componente en los recubrimientos actuales para potencializar sus propiedades de aislante.

Se determinó que el grafito también podría ser útil en el proceso de transporte, debido a su propiedad de anti-adherencia, siendo útil en campos como el proceso de deslizamiento de las piezas, donde se puede utilizar como recubrimiento de los rodillos transportadores o las rampas deslizadoras que se utilicen en el proceso.

De acuerdo a lo mencionado en el documento, se determinaron tres formas en las que el lodo puede ser reutilizado por la empresa Corona, siendo estas la electrocoagulación, la osmosis inversa y mediante la ceniza de lodos de depuración, donde cada una de estas tiene su propia metodología para ser aplicada y cada una otorga como resultado una reutilización del grafito en distintos campos, como lo es la obtención de fundición de grafito, en la producción de cemento o en la producción de energía influyendo en la incineración de combustibles. Con esto se evidencia los múltiples campos de acción en los que el grafito puede ser aplicado luego de cumplir con su vida útil en un determinado proceso, ayudando a generar procesos renovables y el uso y aplicación de economías circulares, lo cual beneficia a la compañía de manera económica y en la producción.

### REFERENCIAS

- [1] F. Sørensen and J. Ole Bærenholdt, *Tourist practices in the circular economy*, 85th ed. Dinamarca: Universidad de Roskilde, 2020. Tomado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160738320301717>
- [2] "¿En qué consiste la economía circular?", *Sostenibilidad.com*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/en-que-consiste-la-economia-circular/>. [Tomado el: 10- Nov- 2020].
- [3] 'Economía circular. Especial Ecolec — Reciclaje y gestión de RAEE', *Ecolec*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecolec.es/informacion-y-recursos/economia-circular/>. [Tomado el: 10- Nov- 2020].
- [4] M. Bilal, K. Ahmad Khan, M. Jamaluddin Thaheem and A. Rehman Nasir, *Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework*. Pakistan: Universidad Nacional de Ciencias y Tecnología, 2020. Tomado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620332959>

- [5] H. O. Pierson, Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes. Albuquerque, New Mexico: Consultant and Sandia National Laboratories, 1994, pp. 46-67. Tomado de: <https://www.sciencedirect.com/book/9780815513391/handbook-of-carbon-graphite-diamonds-and-fullerenes>
- [6] T. D. Burchel and T. R. Pavlov, Graphite: Properties and Characteristics, 7th ed. Estados Unidos: Elsevier Inc, Oak Ridge National Laboratory, Idaho National Laboratory, 2020. Tomado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818117771>
- [7] "Diagramas", Www2.uned.es, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www2.uned.es/cristamine/mineral/quimica/quim\\_term\\_diag.htm](https://www2.uned.es/cristamine/mineral/quimica/quim_term_diag.htm). [Tomado el: 11- Nov- 2020].
- [8] Gestión Ambiental. Residuos Sólidos. Guía para la separación de la fuente, 3rd ed. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - (ICONTEC), 2009. Tomado de: <http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/GTC%2024%20DE%202009.pdf>
- [9] Documento CONPES, Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. Bogotá, Colombia: Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación, 2016. Tomado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%20C3%20B3micos/3874.pdf>
- [10] Diario Oficial de la Federación, Norma oficial mexicana, protección ambiental. - lodos y biosólidos. -especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México: UNINET, 2003. Tomado de: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ecol/semarnat004.pdf>
- [11] R. Minerales, "Grafito · Toda su información, fotografías, usos — Minería en Línea", :: Minería en Línea ::, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://mineriaenlinea.com/rocas\\_y\\_minerales/grafito/Grafito\\_natural-2](https://mineriaenlinea.com/rocas_y_minerales/grafito/Grafito_natural-2). [Tomado el: 15- Nov- 2020].
- [12] "Grafito [ Características ] Propiedades, tipos y usos.", GEOLOGIAWEB, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://geologiaweb.com/minerales/grafito/>. [Tomado de: 14- Nov- 2020].
- [13] "Tipos de grafito: propiedades de grafitos naturales y sintéticos — ESGRAF", ESGRAF, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.esgraf.com.mx/tipos-de-grafito-propiedades-grafitos-naturales-y-sinteticos/>. [Tomado el: 18- Nov- 2020].
- [14] "Graphite Impregnation", Semicocarbon.com, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.semicocarbon.com/blog/graphite-impregnation>. [Tomado el: 16- Nov- 2020].
- [15] "Permanent Mold Casting for High-Volume Production", Deecometals.com, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.deecometals.com/custom-metal-castings/permanent-mold-castings>. [Tomado el: 19- Nov- 2020].
- [16] "Graphite Molds and Continuous Casting - Graphite Products", Semicocarbon.com, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.semicocarbon.com/blog/graphite-molds-and-continuous-casting>. [Tomado el: 19- Nov- 2020].
- [17] "Graphite Cement for Graphite Products", Semicocarbon.com, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.semicocarbon.com/blog/what-is-graphite-cement>. [Tomado el: 20- Nov- 2020].
- [18] N. Oropeza García, Lodos residuales: estabilización y manejo. Chetumal, Quintana Roo, México: Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, 2006.
- [19] Dégremont (1980), Manual técnico del agua, Bilbao, pp 105-473, 749-781.
- [20] H. Eléctricos, "Grafito alineado, la tecnología que multiplica por dos el rendimiento de las baterías de los coches eléctricos", Híbridos y Eléctricos, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/grafito-alineado-tecnologia-multiplica-rendimiento-baterias-coches-electricos/20200703120408036376.html>. [Tomado el: 02- Dec- 2020].
- [21] M. Perez Zuñiga, Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamientos de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2016, pp. 26-28.
- [22] S. Tuset, "Procesos y tecnologías para el tratamiento de lodos", Ingeniería ambiental para el sector industrial, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-lodos/>. [Tomado el: 09- Dec- 2020].
- [23] CRC Industries, Lubricante Seco de Grafito - Ficha Técnica, 7th ed. CRC Industries, 2020.
- [24] Electric S.A.S., Molde Grafito, 6th ed. Electric S.A.S., 2017.
- [25] A. Hernández Martínez, Extracción Micelar de Metales Pesados. Aplicación a su determinación por técnicas espectroscópicas en matrices ambientales e industriales. Valencia: Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir, 2015.
- [26] Gabinete de salud laboral y medio ambiente, Guía Fácil para la Gestión de los Residuos en la Empresa, 1st ed. Navarra: Equipo de Salud Laboral y Medio Ambiente de CC.OO. de Navarra, 2007.
- [27] Terreros-Mecalco, J., Olmos-Dichara, A., Noyola-Robles, A., Ramírez-Vives, F., Monroy-Hermosillo, O. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODO PRIMARIO Y SECUNDARIO EN DOS REACTORES UASB EN SERIE. Revista Mexicana de Ingeniería Química [en línea]. 2009, 8(2), 153-161 [fecha de Consulta 10 de Diciembre de 2020]. ISSN: 1665-2738. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62011384001>
- [28] A. Coz Fernández, Comportamiento ambiental de lodos de fundición estabilizados/solidificados. Santander: Universidad de Cantabria, 2001.
- [29] M. McCann, Metalurgia y Metalistería. ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO, 2020.
- [30] S. Kalpakjian and S. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 5th ed. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [31] D. FRANCO RODRIGUEZ, Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA.. Bogotá, Colombia: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2018.
- [32] Kirk Johnston, H., 1975. Reverse osmosis rejection of heavy metal cations. 16th ed. [En línea] Toronto, Ontario, Canada.: Elsevier B.V. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916400820937> [Tomado el: 09 Dec 2020].