

## **BLOQUE I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Una de las preocupaciones de la sociedad moderna es la protección del medio ambiente. La reducción del consumo energético, la preservación de las fuentes de materia prima y la reducción de residuos son partes principales de ella. Los residuos producidos se tienen que estabilizar e inertizar y, si es posible, se tienen que convertir en objeto de desarrollo de tecnologías limpias de reutilización o de reciclaje.

La cantidad de residuo que no podemos volver a incorporar a los ciclos naturales o a las líneas de producción industrial, por las vías hasta ahora conocidas, es elevada. La falta de desarrollo de nuevas tecnologías de tratamiento resulta evidente y hemos de ser conscientes que el problema será mayor cuanto más tiempo pase, siendo la investigación de nuevas vías de tratamiento un asunto imprescindible. En último término hay que garantizar la seguridad ambiental en el vertido de aquello que, por razones tecnológicas o económicas, no haya podido ser reutilizado.

Este trabajo se enmarca dentro de la problemática de los fangos de depuradora de aguas residuales. Los fangos de depuradora son el resultado de la depuración de aguas residuales. El efecto contaminante de estos lodos es debido básicamente a su alto contenido de materia orgánica, a la presencia de gran cantidad y variedad de microorganismos patógenos y metales pesados.

Los procesos mediante los cuales se eliminan o se reducen las características no deseadas de los lodos para un determinado vertido o aplicación, constituyen la estabilización. Los métodos de estabilización utilizados actualmente varían en función de los condicionantes técnicos y económicos, que se pueden resumir en: la digestión aerobia o anaerobia, el tratamiento con cal, el compostaje, el secado y la incineración. Todos estos sistemas, a excepción del compostaje, implican un vertido final del material. El compostaje del lodo para su utilización como abono o acondicionador de suelo, es el único método que implica un reciclado.

El problema principal radica en la gran dificultad de dar otro tipo de salida a estos residuos. Llegados a este punto, se plantea la posibilidad de emplear el fango seco

proveniente de las depuradoras como material de construcción. En nuestro caso particular, como adición del hormigón.

## 1.2. OBJETIVOS DE LA TESINA

El principal objetivo de la tesina es determinar la influencia de la adición de lodos de depuradora en la durabilidad del hormigón.

En este trabajo se propone la utilización del fango seco como una adición dentro del hormigón, teniendo un sistema: cemento - árido grueso - árido fino - fango seco.

Para la realización de este estudio se ha definido una pauta de trabajo dirigida a la obtención de datos útiles que nos permitan evaluar la durabilidad del hormigón con lodos. Estos pasos son:

- a. La caracterización de todos los componentes que intervienen en el hormigón a estudiar. Esta parte se desarrolla en el capítulo 2. En ella encontraremos el origen y propiedades del cemento, de los áridos y del fango. De éste último también se describe su proceso de obtención.
- b. La producción de probetas, correspondiente al capítulo 3. Allí encontraremos:
  - b.1. Estudio previo del sistema fango seco – cemento.
  - b.2. Mantenimiento de la consistencia en cada dosificación.
  - b.3. Proceso de elaboración, preparación y conservación de las probetas.
- c. Realización de una serie de ensayos (carbonatación, estabilidad volumétrica, ataque por sulfatos, ataque agua de mar, ciclos humedad-sequedad con agua potable) para poder valorar experimentalmente la durabilidad del hormigón estudiado. Esto se realiza en el capítulo 4. Mediante la técnica de difracción de rayos X se estudiará también la posible formación de nuevos compuestos cristalinos debido a la adición de lodos.
- d. Finalmente, en el bloque III se indicarán las conclusiones y un análisis de la posible aplicación del fango seco de depuradora para fines ingenieriles.

### 1.3. LOS FANGOS DE DEPURADORA Y SU SITUACIÓN ACTUAL

Los constituyentes del agua residual eliminados en las plantas de tratamiento incluyen basuras, arena, espumas y fango. El fango producido en las operaciones y procesos de tratamiento de las aguas residuales suele ser un líquido o líquido semisólido con un contenido en sólidos variable entre 0,25 y el 12 por 100 en peso, dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento

De los constituyentes eliminados en el tratamiento, el fango es, con diferencia, el de mayor volumen y su tratamiento y evacuación es uno de los problemas más complejos.

El fango está principalmente formado por las sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas; la fracción del fango a evacuar está compuesta por la materia orgánica presente en aquélla, sujeta a procesos de descomposición, y sólo una pequeña parte del fango está compuesta por materia inorgánica.

La producción de fangos procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas en Catalunya es de 1.000.000 de toneladas / año aproximadamente, y está previsto estabilizar la cifra de 600.000 toneladas / año para el año 2006. A la vez, la Directiva Europea sobre la depuración de aguas residuales 271/CEE de 1991, establece la construcción de plantas depuradoras en las poblaciones de más de 2000 habitantes, antes del 2005. El marco temporal de este objetivo se ha avanzado en Cataluña unos siete años, haciendo que, ya funcionen más de 300 depuradoras con una capacidad de tratamiento de 11 millones de habitantes equivalentes. Estas depuradoras son centros productores de fangos con calidades variables que dependen del agua tratada y de unas producciones que varían según las dimensiones de la planta y el régimen de estacionalidad del agua a tratar, sobretudo en poblaciones de la costa [1].

Una variable básica para el análisis de la problemática de los fangos de depuradora es su destino previsible, condicionado por la calidad del fango y las condiciones del entorno de la planta, donde se pueden desarrollar tratamientos como el compostaje, el secado térmico y la incineración.

Para solucionar este volumen de residuo y su destino final, la *Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya* ha redactado un programa de tratamiento de fangos de las depuradoras de aguas residuales urbanas, dentro del *Pla de Sanejament d'Aigües Residuals Urbanes (PSARU)* [1].

La orientación tecnológica del PSARU tiene dos vertientes:

1. Optar por la construcción de plantas de depuración de aguas residuales, según el tratamiento secundario biológico, que garantiza una mejor y mayor estabilización del fango resultante y reconvertir todas aquellas depuradoras existentes con tratamiento físico-químico a tratamiento secundario biológico. Esto es debido básicamente a la mejor calidad de depuración del tratamiento biológico y al menor volumen de fangos generados.
2. Estudiar el destino final de los fangos para su correcta eliminación, con la disminución de su volumen hasta un 65% como mínimo, mediante la deshidratación de finos.

Con este plan se consigue aumentar la población equivalente servida y disminuir el volumen de fango producido.

### **1.3.1. Destinos actuales del fango de depuradora**

Actualmente en Europa los destinos de los fangos, según el porcentaje en peso, son [2]:

- El 38 % de los fangos debidamente tratados son utilizados en la agricultura como abono.
- El 43 %, se utiliza como relleno de explotación de canteras.
- El 10 % se incinera.
- El 9 % va a diversos lugares y aplicaciones, entre las que predomina su vertido al mar.

En Cataluña, a los fangos se les aplican los mismos destinos citados anteriormente pero con porcentajes diferentes. El caso de incineración de fangos es inexistente, en cambio, el vertido al mar y al vertedero representa uno de los porcentajes más elevados, un 80%. Concretamente la depuradora de Sant Adrià del Bessòs vierte todos sus fangos al mar mediante un emisario submarino. La Comunidad Europea, según la directriz 271/1991/CE, prohíbe el vertido al mar de los fangos de depuradora desde el año 1999.

La creciente y progresiva implantación de nuevas y de exigentes directivas en la gestión de residuos a las sociedades industrializadas, con la perspectiva de un desarrollo sostenible, requiere de la investigación de alternativas más válidas y eficaces que la simple disposición en vertederos.

Es conocido el gran volumen de fango de depuradora generado y su toxicidad. Las aplicaciones más inmediatas actualmente no son suficientes para el volumen generado y gran parte de estos fangos son vertidos al mar.

El interés en la aplicación del fango al suelo ha aumentado en los últimos años como consecuencia de la menor disponibilidad y viabilidad de otras opciones de gestión de los fangos tales como el almacenamiento en vertederos controlados, la incineración y la evacuación al mar.

El fango se puede aplicar en terreno de uso agrícola, terrenos forestales, terrenos marginales y terrenos especialmente preparados para la evacuación de fangos. Estas aplicaciones se pueden realizar vía compostaje o de forma directa al suelo [3].

El fango actúa como acondicionador del suelo para facilitar el transporte de nutrientes, aumentar la retención de agua, y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo. El fango también sirve como sustitutivo parcial de fertilizantes químicos.

Además el fango se puede distribuir y comercializar para usos residenciales y comerciales como acondicionador de suelos, como sustituto de turbas y capas superficiales de abono en céspedes, campos de golf, parques y jardines botánicos y ornamentales. También se puede tratar químicamente para su estabilización y posterior uso como recubrimiento de vertederos controlados o para su uso en proyectos de recuperación o de tratamiento paisajístico de terrenos.

Unas de las posibles soluciones más inmediata es la incineración, que hoy en día es uno de los sistemas de eliminación de residuos más eficaz, pero supone graves problemas económicos y medioambientales (emanación de gases y productos tóxicos).

### **1.3.2. Procedencia de los fangos de depuradora**

La procedencia de los sólidos producidos en las plantas de tratamiento varía en función del tipo de planta y del modo de explotación. Las principales fuentes de sólidos y fangos en una instalación convencional son los siguientes [4]:

1. Desbaste → Sólidos gruesos
2. Desarenado → Arenas y espumas

3. Preaireación → Arenas y espumas
4. Decantación primaria → Fango primario y espumas
5. Tanques de aireación → Sólidos suspendidos
6. Sedimentación secundaria → Fango secundario y espumas
7. Instalaciones de tratamiento de fangos → Fangos, compostaje y cenizas

### 1.3.3. Procesos de producción de los fangos de depuradora

Los procesos de producción de fangos son diversos. Los procesos constan de distintas fases [4].

1. *Operaciones de pretratamiento*: para conseguir que la alimentación de fango a las instalaciones de tratamiento del mismo sea relativamente constante y homogénea. Estas son: dilaceración, desarenado, mezclado y almacenado del fango.
2. *Espesado*: es un procedimiento que se emplea para aumentar el contenido de sólidos del fango por eliminación de parte de la fracción líquida del mismo. Se suele llevar a cabo mediante procedimientos físicos, que incluyen el espesado por gravedad, flotación y centrifugación entre otros. La reducción del volumen de fango resulta beneficiosa para los procesos de tratamiento subsiguientes y para la capacidad de tanques y equipos, cantidad de reactivos químicos para el acondicionamiento del fango y cantidad de calor y combustible en digestores, secado e incineración.
3. *Estabilización*: se lleva a cabo para reducir la presencia de patógenos, eliminar los olores desagradables, y inhibir su potencial de putrefacción. Se ha de actuar sobre la fracción orgánica o volátil del fango, ya que es en ésta donde se desarrollan los microorganismos. Las tecnologías más usuales son la estabilización con cal, el tratamiento térmico, la digestión anaerobia, la digestión aerobia y el compostaje. (Para cada uno de estos tres últimos se dedica un apartado específico más adelante)
4. *Acondicionamiento*: el fango se acondiciona expresamente para mejorar sus características de deshidratación. Normalmente se realiza mediante la adición de reactivos químicos y el tratamiento térmico.

5. *Desinfección*: adquiere gran importancia debido a las restrictivas normas aplicables a la reutilización del fango y a su aplicación al suelo, con tal de garantizar una buena seguridad sanitaria.
6. *Deshidratación*: operación unitaria física utilizada para reducir el contenido de humedad del fango y consecuentemente su volumen. Hay distintos sistemas como las Eras de secado o filtros banda, entre otros. Se hace por distintas razones como reducir costes de transporte, facilitar su manipulación, aumentar su poder calorífico en caso de incineración y en caso de compostaje para reducir el material de enmienda o soporte. Asimismo la deshidratación es útil para reducir la producción de lixiviado, para reducir la generación de olores y evitar que el fango sea putrescible.
7. *Secado térmico*: operación unitaria que involucra la reducción del contenido de agua por la vaporización de ésta al aire. El objetivo es la eliminación de humedad del fango líquido, de forma que se pueda incinerar con eficacia o procesar para su transformación en fertilizante. Se produce una reducción en peso y volumen. Suele venir precedida de un deshidratado. Los inconvenientes que tiene este sistema son los olores producidos y la alta cantidad de calor requerida. Las ventajas son: la utilización de los gases de la digestión como fuente de energía y la obtención de un producto sin gérmenes.
8. *Reducción térmica*: incluye la conversión total o parcial de los sólidos orgánicos a productos finales oxidados o la oxidación y volatilización parcial de los sólidos orgánicos por pirólisis o combustión. Las ventajas son la máxima reducción de volumen, destrucción de patógenos y compuestos tóxicos y la recuperación de energía. Las desventajas son los elevados costes, la necesidad de personal cualificado y un efecto ambiental negativo.

Concretamente, en la depuradora de Sabadell-Riu Sec que es de donde hemos obtenido el fango utilizado en esta tesina, el fango pasa por los siguientes procesos: Operaciones de pretratamiento, rejas de desbaste y tamicas más pequeños seguidos de un desarenador y un desgrasador. Después, tras la adición de un coagulante, se produce la floculación que decanta la materia en suspensión. Seguidamente, en el fondo del decantador primario se depositan los fangos primarios cuyos contaminantes son eliminados biológicamente en el reactor biológico. En el fondo queda el llamado fango secundario que vuelve a ser tratado. El agua ya limpia



continúa su ciclo y los fangos, tras realizar la digestión anaeróbica, se deshidratan y se secan térmicamente.

### 1.3.3.1. Digestión anaerobia

Debido al gran interés que supone el ahorro y la recuperación de energía, y la posibilidad de obtener productos que permitan usos beneficiosos del fango del agua residual, la digestión anaerobia sigue siendo el proceso más extendido.

El proceso de digestión anaerobia de mezcla completa es fundamental en estabilización de la materia orgánica y de los sólidos biológicos.

La materia orgánica contenida en la mezcla de fangos primarios y biológicos se convierte biológicamente, bajo condiciones anaerobias (en ausencia de oxígeno), en metano y dióxido de carbono. El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los fangos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen en su interior durante periodos de tiempo variables. El fango estabilizado, que se extrae del proceso continuo o intermitentemente, tiene un bajo contenido en materia orgánica y patógenos, y no es putrescible.

La conversión biológica de la materia orgánica de los fangos parece que se produce en tres etapas. El primer paso del proceso, hidrólisis, comporta la transformación de los compuestos de alto peso molecular en compuestos que puedan servir como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso, acidogénesis, implica la conversión bacteriana de los compuestos producidos en la primera etapa en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular. El tercer paso, metanogénesis, supone la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y dióxido de carbono.

Esta conversión se lleva a cabo mediante la acción conjunta de diferentes organismos anaerobios. Para mantener un sistema de tratamiento anaerobio que estabilice correctamente el residuo orgánico, los microorganismos formadores de ácidos y de metano se deben encontrar en un estado de equilibrio dinámico. El contenido del reactor deberá carecer de oxígeno disuelto y estar libre de concentraciones inhibitorias de constituyentes tal como los metales pesados y los sulfuros. El medio acuoso deberá tener valores de pH entre 6,6 y 7,6. Y

alcalinidad suficiente para que el pH no descienda de 6,2. Se ha de disponer de suficiente cantidad de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Y los intervalos de temperatura óptimos son el mesofílico (30 a 38 °C) y el termofílico (49 a 57 °C).

El crecimiento de las bacterias formadoras del metano es lento, esto obliga a tiempos de detención más grandes para conseguir la estabilización adecuada, pero también que sólo una parte del residuo orgánico biodegradable está siendo sintetizado en forma de nuevas células. El gas metano se puede emplear para la generación de energía o para proporcionar calefacción a los edificios.

Finalmente tras el proceso de deshidratación o de secado, al estar la materia sólida bien estabilizada, se obtiene un material apto para su evacuación a vertederos, para el compostaje, o para su aplicación al terreno.

#### 1.3.3.2. Digestión aerobia

Es la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia, es decir, con la presencia de oxígeno. El residuo orgánico se introduce en un reactor, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. Las bacterias son las causantes de la descomposición de la materia orgánica del afluente. Los microorganismos utilizan parte de la materia orgánica del agua residual con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica en forma de células nuevas. Sólo una parte del residuo original se oxida a compuestos de bajo contenido energético, el resto se sintetiza en forma de materia celular.

También es importante que formen las bacterias un flóculo adecuado, para la separación de los sólidos biológicos en la instalación de sedimentación.

En la digestión aerobia convencional, el fango se airea durante un largo periodo de tiempo en un tanque abierto, sin calefacción, empleando difusores convencionales o aireadores superficiales. El proceso se puede llevar a cabo de manera continua o discontinua, según si la decantación y concentración del fango se realizan conjunta o independientemente.

Al agotarse el suministro de substrato disponible, los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma para obtener energía para las reacciones de mantenimiento

celular, es lo llamada fase endógena. El tejido celular se oxida a dióxido de carbono, amoníaco y agua por vía aerobia.

### 1.3.3.3. Compostaje

El compostaje es un proceso en el que la materia orgánica sufre una degradación biológica hasta alcanzar un producto final estable. El fango compostado adecuadamente es un material tipo humus, higiénico y libre de características desagradables.

Aproximadamente una cuarta parte de los sólidos volátiles se convierten a dióxido de carbono y agua. Conforme se produce la descomposición de la materia orgánica contenida en el fango, el compost se calienta hasta alcanzar temperaturas situadas en el intervalo de pasteurización lo cual permite la destrucción de organismos patógenos.

Un fango bien compostado se puede emplear como acondicionador de suelos en usos agrícolas y hortícolas.

Dentro de la planta de compostaje se producen cuatro fases: pretratamiento de materia orgánica con una trituración y una mezcla adecuada, fase intensiva donde se ataca la materia orgánica más débil, fase de maduración donde se recombinan las moléculas y se da tiempo para obtener una buena calidad y finalmente el postratamiento que da las características que requiere el mercado al producto.

Se puede llevar a cabo tanto bajo condiciones aerobias como anaerobias.

En condiciones aerobias, las bacterias aprovechan la energía contenida en la materia orgánica, realizan una oxidación biológica controlada lo más rápidamente posible. Para obtener un funcionamiento óptimo se han de dar unas características; como la relación carbono-nitrógeno de 30:1, necesidad de oxígeno, humedad del 60%, tamaño de partícula de entre 0,3-5 cm y una temperatura de entre 60 y 70 °C.

Las moléculas compuestas, complejas e inestables pasan a ser simples para luego volver a moléculas complejas pero ahora siendo materia orgánica estable. Se obtiene un producto que se parece a la tierra vegetal o humus, puesto en el terreno se va biodegradando lentamente liberando los nutrientes que tiene. Esto se aplica a pilas de materia orgánica.

También se puede obtener compost por medio de la digestión anaerobia. En ausencia de oxígeno las bacterias se alimentan también de proteínas, lípidos... y acaban produciendo biogás. También se requiere de unas buenas condiciones como la relación de carbono-nitrógeno de 30:1, humedad mayor del 75%, ir añadiendo energía al sistema y dos temperaturas, la mesofílica y la termofílica.

#### **1.3.4. Características de los fangos de depuradora en general y su inmovilización**

Las características de un fango de depuración de agua residual viene determinada por su origen, su estructura y su composición química [5]:

- Concentración de materia seca (gr/l).
- Pérdida por ignición, indicando el contenido de materia orgánica.
- Contenido en carbono orgánico, nitrógeno total y azufre total en el caso de aplicarse en agricultura.
- Concentración de metales pesados.
- Contenido de agua en el lodo.

El agua en el fango está presente como agua libre y como agua ligada a los coloides y a los compuestos químicos o minerales. Por otro lado, los metales pesados se encuentran distribuidos por el fango entre las fases minerales insolubles y las fases celulares o intracelulares orgánicas. La afinidad de los metales pesados con cada una de estas fases sólidas depende del método de tratamiento del fango y la movilidad de estos metales pesados está estrechamente ligada al tratamiento de estabilización del mismo.

La digestión anaerobia tiene un fuerte efecto sobre la inmovilización de los metales pesados debido a la formación de sulfuros metálicos, los cuales presentan una baja solubilidad [6]. En consecuencia, la movilidad de los contaminantes en el fango de depuradora está muy ligada con el tratamiento de estabilización al que ha estado sometido. El ensayo de extracción de metales a partir de un fango de digestión anaerobia mediante agua pura demuestra que la fracción de metales extraíbles es baja, en términos medios es del orden del 10 % del total de los elementos.

Como procesos de inmovilización tenemos la solidificación / estabilización que se definen como las técnicas que permiten fijar o encapsular los componentes (orgánicos e

inorgánicos) del residuo dentro de una matriz rígida y compacta. Aunque los términos de solidificación y estabilización son muy parecidos existen ciertas diferencias entre ellos.

- La solidificación corresponde a las técnicas que permiten mejorar las propiedades mecánicas, físicas y de manipulación del residuo, confinando el residuo dentro de un sólido monolítico sin la implicación química entre residuo y agentes solidificantes.
- La estabilización consiste en mezclar los componentes del residuo con los agentes inertizadores con el fin de reducir la solubilidad y la migración de los contaminantes, mediante la interacción química. En este proceso, diferentemente a lo que pasa con la solidificación, no ha de haber un cambio en las propiedades mecánicas ni de manipulación del residuo.

La mayoría de las técnicas que se utilizan para transformar un residuo peligroso en una sustancia de menor potencial contaminante, se pueden clasificar tanto como de solidificación como de estabilización de residuos. Todo esto, se consigue por los siguientes procedimientos:

- Mejorando la manipulación y las propiedades físicas del producto obtenido.
- Disminuyendo la superficie de exposición del residuo.
- Limitando la solubilidad de los contaminantes del residuo.

El uso de ligantes hidráulicos para la estabilización y solidificación de residuos viene utilizándose desde hace más de 15 años en el tratamiento de residuos radioactivos. El tipo de residuo determina las condiciones de operación y de los procesos de inertización, por ejemplo, en el caso de los residuos radioactivos existen tres técnicas básicas: la vitrificación, la cimentación y los recubrimientos bituminosos.

El cemento Pórtland es uno de los ligantes hidráulicos más utilizados para la estabilización y solidificación de residuos, ya que consta principalmente de óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro, magnesio, sodio y potasio, y sulfato de calcio, los cuales por el proceso de hidratación llevan a la formación de una estructura sólida y porosa. Esta hidratación crea simultáneamente la solidificación física y química de los residuos [5].

Uno de las grandes ventajas del proceso es el medio alcalino que crea el sistema, del orden de 12,5 a 13,5 de pH. Esta alcalinidad afecta directamente al proceso de lixiviación, sobre todo en aquellas especies metálicas que contiene el residuo [7].

En el sistema alcalino creado influyen:

- La formación de hidróxidos insolubles.

- La inserción de ciertos metales en algunas de las fases de los hidratos del cemento Pórtland, especialmente la sustitución de iones de calcio y sulfatos en el hidrato etringita.
- La simple retención física en la estructura porosa.
- La adsorción en la superficie del silicato cálcico hidratado.

La valoración de la solidificación y de la estabilización vendrá determinada por el proceso de lixiviación [8].