

TEMA FILTRACIÓN

- 1.- OBJETIVOS. TIPOS. MECANISMOS DE SEPARACIÓN
- 2.- VARIABLES GENERALES DEL PROCESO
 - 2.1.- Caracterización del lecho filtrante
 - 2.2.- Agua a filtrar
 - 2.3.- Velocidad de filtración
- 3.- FILTRACIÓN LENTA
 - 3.1.- Características
 - 3.2.- Funcionamiento
 - 3.3.- Características estructurales
 - 3.4.- Ventajas y limitaciones de la filtración lenta

1.- OBJETIVOS. TIPOS. MECANISMOS DE SEPARACIÓN

El objetivo de la filtración es retener los sólidos en suspensión que transporta un agua, que antes puede haber pasado por un proceso de decantación. La filtración a través de material granular, por ejemplo lechos de arena, se basa en la capacidad de retención de sólidos en el seno o volumen del lecho filtrante, aunque también puede darse eliminación superficial simultáneamente. Para que una filtración de este tipo sea eficaz se requiere que los sólidos puedan penetrar profundamente dentro del lecho y no bloquearlo en superficie. Por otra parte, es preciso seleccionar un material filtrante con una granulometría y espesor de lecho tales que el filtrado alcance la calidad deseada.

La eliminación de SS se puede hacer también mediante sistemas de filtración superficial. Esta se realiza a través de medios porosos tipo membranas. Estas membranas pueden ser consideradas microtamices, con diámetros de poro o luz de malla entre 10 y 100 μm . Se fabrican de materiales plásticos o metal. Las materias en suspensión para ser eliminadas deben tener un tamaño mayor que el diámetro del poro del filtro. La acumulación de sólidos en la superficie de la membrana llega a formar una torta, que también colabora en la filtración.

Aunque el mecanismo de la filtración superficial es relativamente claro y simple, el de la filtración granular no lo es tanto.

La retención por tamizado es el principal mecanismo responsable de la eliminación de los sólidos en suspensión en la filtración a través de lecho granular:

- **Tamizado mecánico:** Las partículas de mayor tamaño que los poros del medio filtrante son retenidas mecánicamente. Si se considera, por ejemplo, un diámetro de material filtrante de 0.150 mm el poro intersticial será del orden de 20 μm . Este tamaño de poro es muy aceptable para eliminar los sólidos en suspensión presentes en un agua para abastecimiento, bien sea bruta o sedimentada. Además del tamizado en superficie se da el mismo fenómeno en el interior del lecho granular. Los huecos entre

partículas del lecho filtrante se van rellenando y cada vez son más pequeños. Llega un momento en que la partícula sólida encuentra un poro por el que no pasa y queda retenida.

Sin embargo, hay otros mecanismos que también tienen influencia, aunque sus efectos sean de menor importancia y puedan quedar enmascarados por el de tamizado. Se trata de mecanismos de **transporte** de las partículas hasta la superficie del material filtrante, y mecanismos de **fijación** a su superficie.

Durante el **transporte** de los sólidos en suspensión a través del lecho pueden darse los siguientes procesos:

- a) **Decantación:** El lecho filtrante se puede considerar como un conjunto de tubos que pueden actuar como decantadores. Se podría aplicar la misma teoría que en la decantación laminar o tubular. Un lecho filtrante puede tener una superficie específica del orden de $15.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Suponiendo que las partículas del lecho son cubos, la superficie específica de decantación sería del orden de $1/6$ ($2500 \text{ m}^2/\text{m}^3$), pero en la realidad se consideraría una superficie horizontal de decantación del orden de $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Se podrían llegar a eliminar partículas con diámetros $\geq 4 \mu\text{m}$.
- b) **Acción de fuerzas centrífugas:** El agua que circula por las canalizaciones sigue trayectorias curvilíneas. Aparecen fuerzas de inercia y las partículas chocan entre sí y pueden formar flóculos.
- c) **Fenómenos de intercepción:** Las partículas acaban chocando contra el material filtrante y pueden quedar atrapadas o fijadas a su superficie.
- d) **Fenómenos de difusión:** Las partículas más pequeñas tienen un movimiento propio que puede facilitar los choques, favoreciendo la formación de flóculos y la fijación al material del lecho filtrante.

Las partículas pueden quedarse adheridas al material filtrante mediante diferentes fenómenos de **fijación**:

- e) **Fenómenos de adsorción:** Este fenómeno es fundamental cuando se utiliza carbón activo como medio filtrante.
- f) **Interacción electrostática:** Dependerá de las características iónicas del medio filtrante y del contaminante a eliminar.
- g) **Adsorción química.** Por enlaces o interacción química.

Estos mecanismos de fijación pueden actuar simultáneamente. El crecimiento biológico dentro del filtro reducirá el tamaño del poro y puede mejorar la eliminación de partículas mediante alguno de los mecanismos de eliminación descritos (casos a-d).

La importancia de los fenómenos citados dependerá del tipo de agua, del medio filtrante, del tipo de coagulante usado, etc.

La adherencia va a ser fundamentalmente un equilibrio de fuerzas, si cambian las circunstancias puede producirse la resuspensión de las partículas. En una situación de filtración a caudal constante el proceso es bastante estable. Si se produce una reducción del caudal de agua a filtrar tampoco se va a producir ningún problema importante. Sin embargo, si se incrementa el caudal se rompe el equilibrio de fuerzas y las partículas retenidas y fijadas se pueden desprender y ser arrastradas. Se produce la llamada "**rotura del filtro**". En el efluente del proceso aumenta la turbidez y el agua pierde calidad, puede llegar a ser peor que la que entraba en el filtro. En la explotación de los filtros se debe tener especial cuidado con las oscilaciones de caudal de tratamiento.

2.- VARIABLES O PARÁMETROS DEL PROCESO

Las variables más significativas para el diseño y /o funcionamiento del proceso son: características del material filtrante; características del agua a tratar y filtrada y la velocidad de filtración.

2.1.- PARÁMETROS DEL LECHO FILTRANTE

Las características fundamentales que definen un lecho filtrante son:

- **Material granular:** el más utilizado es la arena silíceo ($\rho \sim 2.65 \text{ T/m}^3$). También se utiliza antracita ($\rho \sim 1.35 \text{ a } 1.75 \text{ T/m}^3$) y granate ($\rho \sim 4 \text{ a } 4.2 \text{ T/m}^3$). Se puede emplear también carbón activo granular, incluso con otros objetivos además de medio filtrante (adsorción).
- **Granulometría del material filtrante:** se define a partir de: tamaño de partícula y uniformidad de tamaños. El tamaño va a determinar la luz de los intersticios. Se caracteriza mediante el d_{10} o luz de malla que deja pasar un 10 % en peso del material. El d_{10} es el **tamaño o diámetro eficaz o efectivo**. El coeficiente de uniformidad C_u da idea de la mayor o menor diversidad de tamaños. Se obtiene mediante la relación:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

En donde d_{60} es la luz de la malla que sólo deja pasar un 60 % del material filtrante. Es recomendable que el C_u sea menor que 2.

Al d_{10} y al C_u se les denomina **parámetros de Hazen**.

En el caso de la **arena** el tamaño efectivo varía de 0.50 a 2,50 mm. La selección del d_{10} depende del tipo de filtro y de la aplicación de la operación de filtración.

La **antracita**, cuando se emplea, tiene un tamaño eficaz de 0,70 mm. Se trata de un carbón no aglomerante con un porcentaje de materia volátil del 3 al 8 %. La arena de **granate o ilmenita** se emplea en filtros multicapas, se usa material fino (pequeño d_{10}).

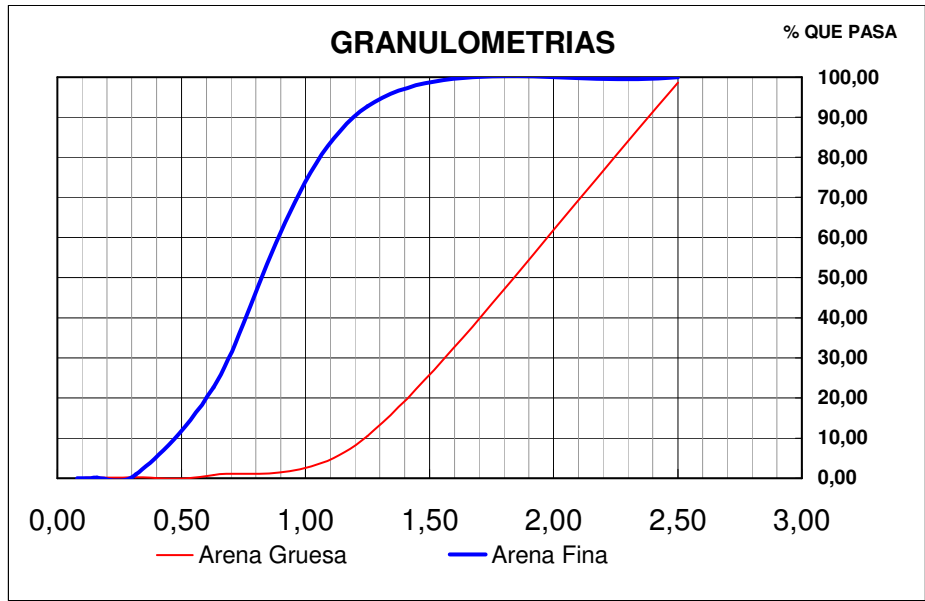


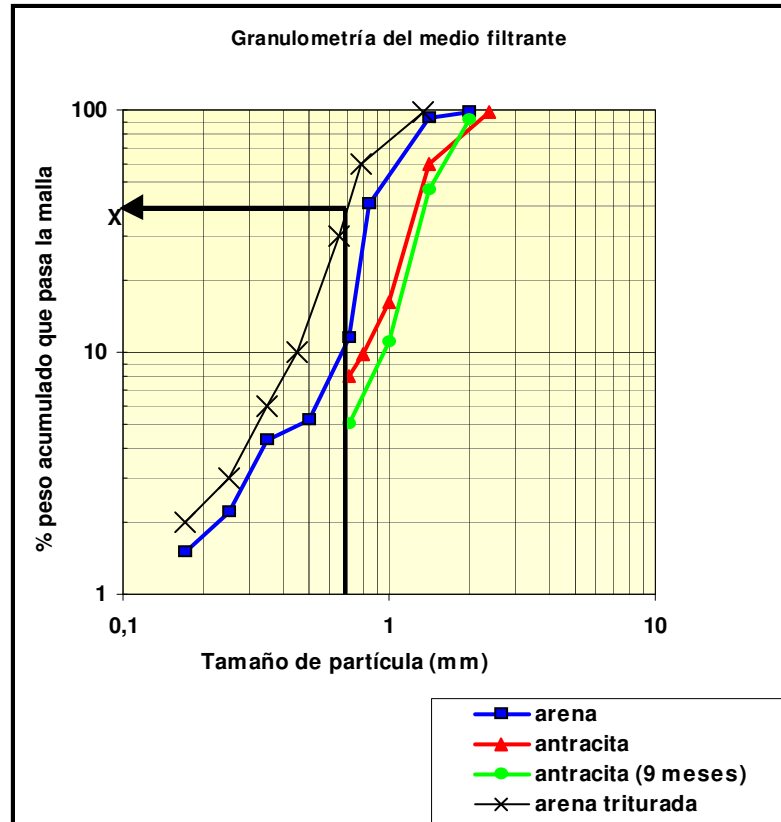
Figura.- Distribución granulométrica de dos arenas (Vázquez, 2000)

- Atacabilidad:** El material puede degradarse por acción de agentes agresivos. La acidez del agua, por ejemplo debido al $\text{CO}_{2(g)}$ disuelto, puede atacar al material. Para evaluar la atacabilidad se sumerge el material filtrante en una solución de ácido sulfúrico al 5% durante 24 horas y posteriormente se seca y se pesa. La reducción de peso debe ser menor del 2% para que sea un material aceptable (Degrémont, 1973). Si se emplea ácido clorhídrico al 40%, la pérdida de peso deber ser inferior al 5% al cabo de 24 horas (Steel y McGhee, 1981).
- Friabilidad:** La arena debe ser dura y resistente. Es decir, la formación de finos por desgaste del material debe minimizarse. La acción de los lavados puede generar finos que atasquen el proceso (incluso, que escapen en los subsiguientes lavados). Se evalúa la friabilidad de un material determinando la cantidad que se mantiene utilizable, es decir que tiene el mismo tamaño efectivo que la muestra original, después de ser triturado en condiciones normalizadas. Se llevan a cabo dos mediciones: una tras 15 min y otra después de 30 min de trituración. Si se designa con X el porcentaje de material triturado con tamaño efectivo inferior al inicial, la friabilidad o pérdida se estima mediante:

$$\text{Pérdida en \%} = \frac{10}{9} (X - 10)$$

Tabla.- Valores límites de la friabilidad (Degrémont, 1973)

Calificación	15 minutos	30 minutos
Muy bueno	6 al 10 %	15 al 20 %
Bueno	10 al 15 %	20 al 25 %
Mediocre	15 al 20 %	25 al 35 %
Totalmente rechazable	> 20 %	> 35 %



- **Geometría del lecho:** El espesor o altura del lecho y la superficie filtrante también son variables importantes. Habrá un espesor mínimo necesario que deberá utilizarse para obtener el mejor filtrado. La superficie filtrante vendrá fijada por el valor de diseño de la velocidad de filtración.

2.2.- AGUA A FILTRAR. EFICACIA DEL PROCESO

La composición del agua problema será fundamental en el comportamiento del filtro y en los resultados que se van a obtener. Las características más importantes del agua a filtrar son la concentración de sólidos en suspensión, el tamaño y la distribución de tamaños de las partículas y la consistencia de los flóculos. Un agua natural que se vaya a filtrar no debe tener una concentración de sólidos superior a un cierto límite ya que sino el funcionamiento y la explotación del filtro no serían rentables. Un agua coagulada, floculada y decantada ve mejorada su calidad antes de ser filtrada. El filtro es capaz de retener flóculos y partículas que hayan escapado a la decantación. La filtración es un proceso válido para aguas de piscinas.

Por lo general, las partículas en suspensión tienen una distribución bimodal de tamaños. Hay una fracción de partículas pequeñas en torno a las 5 μm , y otra de mayor tamaño en torno a las 80 μm . Lo importante de esta distribución bimodal de tamaños es que los mecanismos para eliminar unos y otros durante la filtración deberán ser diferentes.

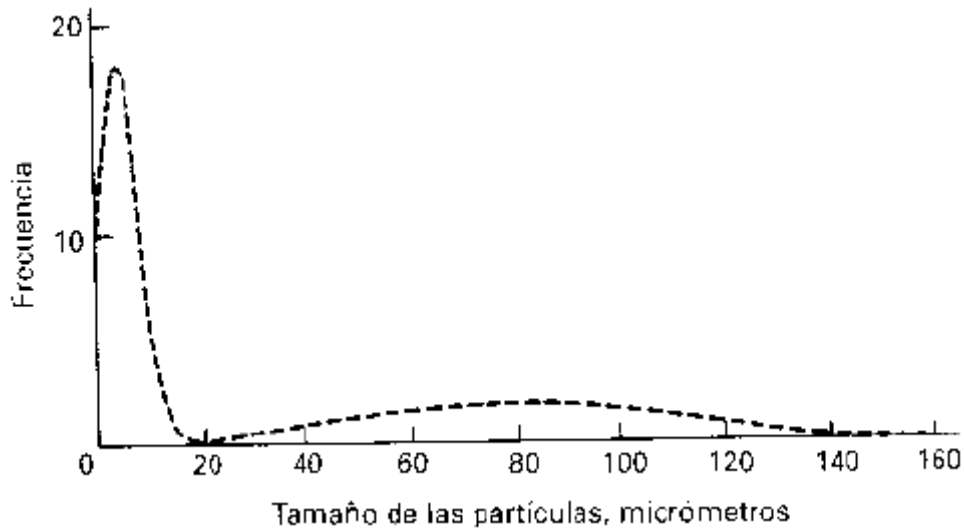


Figura.- Distribución del tamaño de partículas de un efluente tratado (Reproducida de Metcalf & Eddy, 1995)

Cuando el agua ha sido previamente coagulada y floculada, la **consistencia** de los flóculos será importante. Esta propiedad dependerá de las características de los sólidos originales pero también de los productos químicos empleados y del funcionamiento de los procesos de coagulación, floculación y, en su caso, decantación.

El objetivo de la filtración es eliminar sólidos en suspensión. El rendimiento del proceso se verá reflejado en la disminución de la turbidez del efluente. Tanto la concentración de SS como la turbidez en el efluente serán referencias válidas a la hora de medir la eficacia del proceso. La turbidez es fácilmente medible de forma directa y continua, y correlaciona muy bien con la concentración de SS para un agua dada. El lecho filtrante va sufriendo un ensuciamiento conforme va tratando agua. Llega un momento en que la **turbidez máxima admisible** se supera y el proceso deja de ser eficaz. Hay que proceder a limpiar o lavar el lecho filtrante.

Otra forma de conocer la pérdida de efectividad del proceso es mediante la medida de la **pérdida de carga** hidráulica. El lecho al atascarse ofrece cada vez más resistencia al paso del agua. El nivel del agua sobre el lecho va aumentando. Una forma de control es fijar una **altura máxima del nivel de agua** y considerar que es necesario el lavado cuando se supera dicho nivel.

Al tiempo de funcionamiento de un filtro entre dos lavados se denomina CARRERA DEL FILTRO.

2.3.- VELOCIDAD DE FILTRACIÓN

Para conseguir unos rendimientos adecuados el caudal a filtrar debe estar relacionado con la superficie de filtración disponible. Como parámetro básico de diseño se utiliza la VELOCIDAD DE FILTRACIÓN, V_f , que es la relación entre el caudal, Q , y la superficie horizontal del lecho, S_f :

$$V_f = \frac{Q}{S_f}$$

La velocidad de filtración dependerá del diámetro efectivo del material filtrante y de la consistencia de los flóculos o sólidos. Mientras más consistente es un flóculo, para un mismo tamaño de poro del lecho, más alta puede ser la velocidad de filtración sin que el flóculo se rompa, y por lo tanto será necesaria una menor superficie de filtración.

En función de la velocidad de filtración a través de medio granular, se diferencia entre:

- Filtración lenta
- Filtración rápida

3.- FILTRACIÓN LENTA

La filtración lenta tiene por objeto tratar aguas con concentraciones muy bajas de sólidos en suspensión. Si las concentraciones fueran elevadas las carreras de los filtros lentos serían muy cortas. La filtración lenta es un proceso de tecnología sencilla que ofrece buenos resultados.

3.1.- CARACTERÍSTICAS

A partir de los parámetros de Hazen y de la velocidad de filtración se puede describir un filtro lento como aquel que tiene:

- material filtrante fino con un d_{10} entre 0.15 y 0.35 mm;
- $C_u < 3$ (preferiblemente < 2);
- velocidad específica de filtración:

$$V_f = \left(\frac{Q}{S_f} \right) \longrightarrow 0.1 - 0.4 \text{ m/h} \quad \left(2.5 \text{ a } 10 \text{ m/d} \right)$$

- el agua a filtrar debe tener baja turbidez y de valor estable; $SS < 15 \text{ mg/L}$, $Turbidez < 5 \text{ UFT}$ ($turbidez < 50 \text{ mg/L}$ de SiO_2 , el óptimo sería del orden de 10 mg/L de SiO_2).

Si el agua que llega a la filtración lenta supera los valores de turbidez fijados o tiene altas concentraciones de SS habría que utilizar procesos previos de decantación.

3.1.1.- Hidráulica de la filtración

Una de las primeras cosas a estudiar es el comportamiento hidráulico dentro del filtro de arena. El objetivo es saber la altura de agua necesaria para garantizar que la velocidad de filtración se encuentre dentro de los siguientes valores:

$$0.1 \text{ m/h} \leq V_f \leq 0.4 \text{ m/h}$$

Para que se cumplan estas velocidades se requiere estimar la columna de agua necesaria para vencer la resistencia que ofrece el lecho de arena y a la vez controlar la velocidad del flujo en el medio poroso. Si se considera que el agua va a seguir un régimen laminar en su filtración y se va a mantener una presión constante de agua de entrada se puede utilizar la ley de Darcy, con la siguiente forma:

$$Q = k A \Delta h$$

Donde, k es el coeficiente de Darcy o de conductividad hidráulica o de permeabilidad y Δh es el gradiente hidráulico. Adaptando la ley de Darcy a un filtro genérico, tal como se muestra en la figura siguiente, se obtiene la siguiente ecuación:

$$(H_1 - H_2) = (V_f / k) \cdot L$$

Donde, L es la altura de la capa de arena.

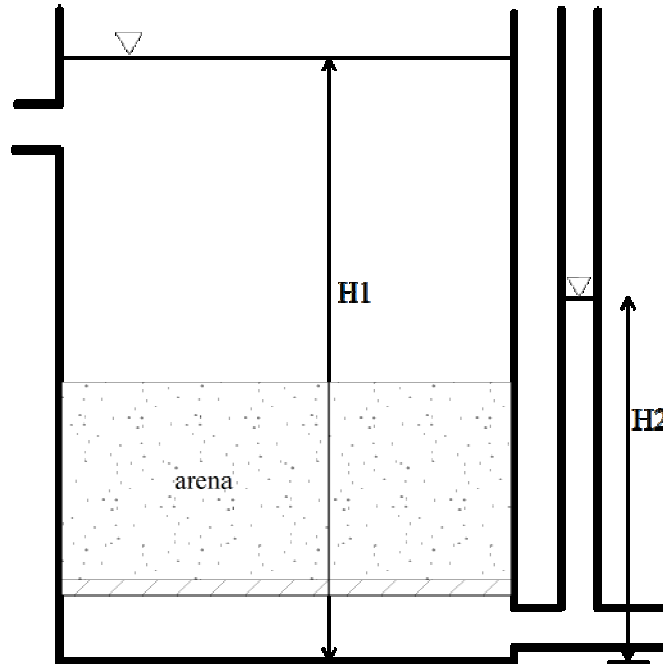


Figura 1.- Representación de la ley de Darcy en un filtro

Así, el caudal, Q , de agua que va a pasar por el filtro viene controlado por:

- La cota de agua bruta H_1
- La cota de agua tratada H_2
- La velocidad de filtración, V_f

A medida que pase el tiempo, la velocidad de filtración va a disminuir debido a la acumulación de partículas en la arena, disminuyendo el valor de la permeabilidad. Por este motivo es más que recomendable asegurar una altura de agua bruta constante encima del lecho de arena (es decir $H_1 = \text{cte}$) y controlar la velocidad de filtración en la salida del agua tratada (H_2 variable).

De esta forma se podrá saber cuándo la permeabilidad del filtro es muy baja (filtro colmatado), y que por lo tanto se debe efectuar la limpieza del lecho de arena.

Utilizando la Ec. anterior se puede estimar la pérdida de carga mínima para que el flujo pueda atravesar una determinada altura de lecho de arena con una velocidad adecuada (por ejemplo: 0.2 m/h). Los resultados obtenidos se representan en la figura siguiente para distintos valores de k .

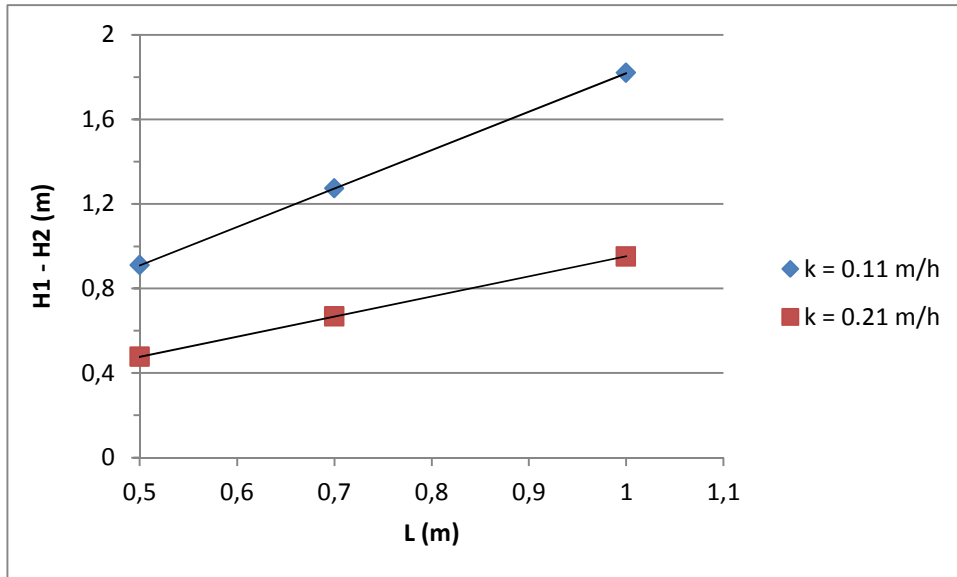


Figura 2.- Pérdida de carga mínima para distintas permeabilidades en función de la altura de la arena ($V_f = 0.2 \text{ m/h}$)

A medida que pasa el tiempo el agua va a tardar más en recorrer el mismo espesor L , ya que las impurezas van a quedar retenidas en el lecho de arena, concretamente en la parte superior del lecho filtrante, capa de ensuciamiento. Así que en este pequeño espesor, de apenas 2 cm, es donde se va a localizar una mayor resistencia al paso de agua mientras que en el resto de la arena la permeabilidad se va a mantener más o menos con el mismo valor que al inicio.

La conductividad hidráulica de arenas o sedimentos arenosos puede ser estimada a partir de una curva granulométrica o de distribución de tamaños. Una serie de métodos han sido desarrollados a partir de esta idea. El método de Hazen puede ser utilizado en el caso de arenas cuyo diámetro efectivo (d_{10}) se encuentre entre 0.1 y 3 mm y con un $Cu < 5$. La aproximación de Hazen es:

$$k = C \cdot (d_{10})^2 \quad (3)$$

Donde, k se expresa en cm/s, d_{10} en cm, y C es un coeficiente empírico que se describe a continuación:

$$C = 70 + 3T/86.4 \text{ (siendo } T, \text{ la temperatura en } ^\circ\text{C)}$$

Tabla.- Valores de referencia para el parámetro C de la fórmula de Hazen

Material:	Valor de C
Arena muy fina, mal distribuida	40 - 80
Arena fina con una gran cantidad de material fino	40 - 80
Arena media, bien distribuida	80 - 120
Arena gruesa, mal distribuida	80 - 120
Arena gruesa, bien distribuida, limpia	120 - 150

3.2.- FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un filtro lento es relativamente sencillo. En la superficie del lecho filtrante se forma una película biológica de un espesor de 1 a 2 cm constituida por muchos tipos de microorganismos.

Realizan una función de filtración en superficie, pero también son capaces de eliminar materia orgánica disuelta y coliformes. Para que se genere esta biopelícula es necesario que pase un determinado intervalo de tiempo, denominado de maduración del filtro, que es muy variable y depende fundamentalmente del tipo de agua.

La carrera del filtro es superior a dos semanas (normalmente entre 2 y 3 meses), con resultados válidos. Para su limpieza son necesarios 1 o 2 días. En el proceso se vacía el depósito, se elimina la biopelícula y algo de arena (1 - 2 cm). La arena se debe reponer cada 5 años, aproximadamente. El filtro debe diseñarse adecuadamente para optimizar los períodos de mantenimiento y explotación.

3.3.- CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

En la figura siguiente se presenta un diagrama esquemático de una sección de un filtro lento.

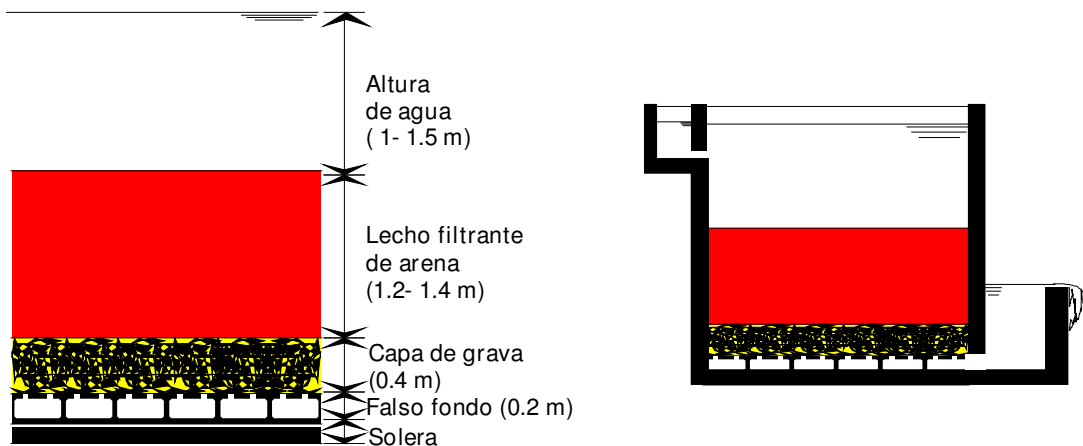


Diagrama esquemático de un filtro lento

La altura máxima del nivel de agua sobre el lecho suele estar entre 1 y 1.5 metros. Conforme el lecho se va ensuciando la altura va a aumentar al incrementarse la pérdida de carga. El lecho filtrante de arena puede tener un espesor variable entre 1.2 y 1.4 metros. Medio metro del lecho podría consumirse en las operaciones de limpieza y siempre quedaría un lecho filtrante de entre 0.7 y 0.9 m. Debajo del lecho de arena debe colocarse una capa de grava que actúe como soporte y filtro de la arena. Debajo de la grava se coloca una solera perforada, ladrillos con huecos o tramos de tuberías sin juntas, que actúan como drenajes de fondo.

Es conveniente tener varios filtros para funcionar de forma alterna (limpieza, maduración, etc.). Para determinar el número de filtros necesarios se puede emplear la siguiente expresión:

$$n \approx \frac{1}{4} \cdot \sqrt{Q} \quad \text{con } Q \text{ en } m^3/\text{hora}$$

En todo caso, el valor de n debe ser siempre igual o mayor de 2.

Suelen ser siempre mayores o próximos a 100 m^2 . La superficie de cada unidad de filtración no debe superar los $2000 - 5000 \text{ m}^2$. Los valores máximos tienen problemas de oleaje.

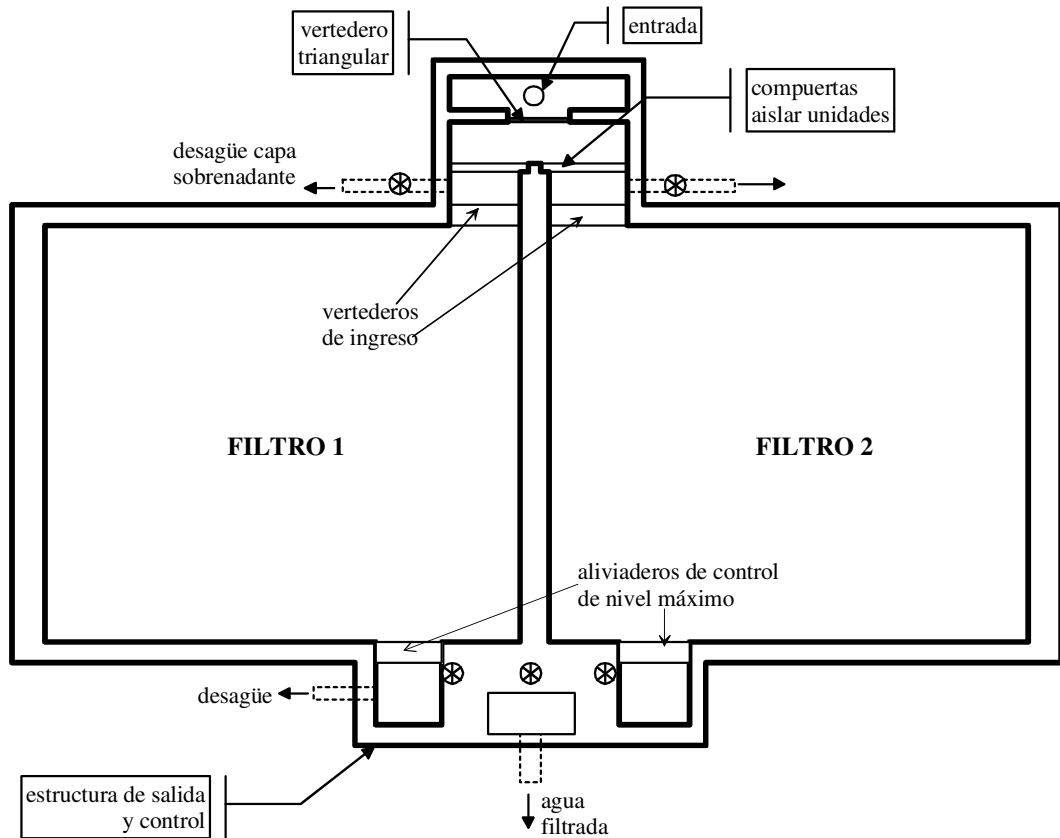


Figura.- Esquema de una planta de filtros lentos

3.4.- VENTAJAS Y LIMITACIONES

Ventajas de la filtración lenta:

- Se obtiene un agua de calidad muy elevada. Se llega a reducir la contaminación bacteriológica en tres órdenes de magnitud, que deja a un agua natural en magníficas condiciones, sin utilizar reactivos o tratamientos químicos.
- La construcción es fácil y con materiales sencillos. No se necesitan complementos electromecánicos. El coste de construcción puede ser bajo.
- La explotación y el mantenimiento es sencillo. Se puede utilizar mano de obra no cualificada y el control del rendimiento del proceso es fácil de realizar a partir de la medición de la turbidez.
- Las pérdidas de agua son muy limitadas, no hay agua que deba rechazarse.

- El fango y la biopelícula, junto con una pequeña cantidad de arena, es un buen acondicionador de suelos. No hay problemas con posibles compuestos químicos ya que no se ha añadido ninguno.

Limitaciones:

- El coste depende de los países y de las zonas.
- Puede demandar mucho terreno, por lo que podría pasar que no se disponga o que sea muy caro. Podría quedar limitada su aplicación a poblaciones pequeñas.
- En climas extremos, muy fríos, la superficie de agua se puede congelar, siendo necesario cubrir el filtro, con el consiguiente coste.
- Muy sensible a los cambios en la calidad del agua bruta, que se precisa constante y con bajas concentraciones de SS.
- La luz y los elevados tiempos de retención hidráulica pueden permitir el desarrollo de algas que taponen el filtro. Para eliminar la luz puede ser necesario cubrir el depósito.

EJERCICIOS

E1.- ¿A qué se denomina diámetro efectivo o eficaz del material de un filtro?

E2.- ¿Qué es el coeficiente de uniformidad del material de un filtro?

E3.- Cita y comenta las características fundamentales que definen un lecho filtrante.

E4.- ¿Qué es la velocidad de filtración?

E5.- ¿Qué es la carrera de un filtro?

E6.- Cita y acota valores de los parámetros fundamentales de la filtración lenta.

E7.- ¿En qué consiste el período de maduración de un filtro lento?

E8.- Ventajas y limitaciones de la filtración lenta.

E9.- Diseñar un filtro lento de arena para tratar un caudal de 800 m³/d.

BIBLIOGRAFÍA

AWWA; (1975); "Control de calidad y tratamiento de agua"; American Water Works Association; Instituto de Estudios de la Administración Local; Madrid.

AWWA; (1990); "Water Quality and Treatment"; American Water Works Association. McGraw-Hill, 4ª edición.

- AWWA -ASCE; (1998); "Water Treatment Plant Design"; American Water Works Association. – American Society of Civil Engineering. McGraw-Hill, 3ª edición.
- CLARK, J.; (1977); "Water supply and pollution control"; Hasper international Edition; Nueva York.
- DEGRÉMONT; (1973); "Manual técnico del agua"; tercera edición española.
- DEGRÉMONT; (1979); "Manual técnico del agua"; cuarta edición española.
- ESPINOZA, C. 2004. Apuntes del curso de hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento (Código asignatura: CI51J). Semestre Otoño 2004. Universidad de Chile.
- FAIR, G.M.; GEYER, J.C.; OKUN, D.A.; (1971); "Ingeniería sanitaria y de aguas residuales"; 2 vol.; Editorial Limusa - Willey; México.
- GOMELLA, C.; GUERREE, H.; (1977); "Tratamiento de aguas para abastecimiento público"; Editores Técnicos Asociados; S.A.; Barcelona.
- HERNÁNDEZ, A.; (1993); "Abastecimiento y distribución de agua"; Colección Señor (nº 6); Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Madrid; 3º edición.
- JOERG, Werner B. 1996. "Introduction to hydrology". University of Alberta.
- KEINATH, T.M.; WANIELISTA, M.; (1975); "Mathematical modeling for water pollution control processes"; Ann Arbor Science, Michigan.
- METCALF-EDDY; (1985); "Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales"; Editorial Labor; Barcelona; ISBN 84-335-6421-8.
- NALCO CHEMICAL, Co.; (1993); "Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones"; McGraw-Hill; México.
- PAZ MAROTO, J.; PAZ CASAÑÉ, J. M.; (1969); "Abastecimiento y depuración de agua potable"; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- ROMERO, J. (1999). "Potabilización del agua". Editado por: Alfaomega y Escuela Colombiana de Ingeniería. 3ª edición.
- RIGOLA LAPEÑA, M.; (1989); " Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales"; Colección Productiva; Editorial Marcombo; Barcelona; 158 págs.
- STEEL, E.W.; MCGHEE, T.; (1981); "Abastecimiento de agua y alcantarillado"; Editorial Gustavo Gili, S.A.; Barcelona; 636 págs.
- TEBBUTT; T. H. Y.; (1990); "Fundamentos de control de la calidad del agua"; Editorial Limusa; México; 240 págs.
- WEBER, W. J. (1979); "Control de la calidad del agua. Procesos físico químicos"; Edit. Reverté; Barcelona, 654 pgs.