

# COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DEL AGUA

## Degrèmont

### 1. GENERALIDADES

La pequeña dimensión de las partículas coloidales presentes en un agua, así como la existencia de cargas negativas repartidas en su superficie, dan lugar a una gran estabilidad de las suspensiones coloidales <sup>1</sup>.

En el campo del tratamiento de aguas, la coagulación es, por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguirse especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas. Se llama coagulante al producto utilizado para esta neutralización.

La agrupación de las partículas descargadas, al ponerse en contacto unas con otras, constituye la floculación, que da lugar a la formación de flóculos capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento del agua. Algunos productos pueden favorecer la formación del flóculo; a éstos se les llama floculantes.

La separación sólido-líquido, del flóculo formado y del agua, puede hacerse por filtración, por decantación o flotación, seguidas o no de filtración.

La coagulación y la floculación intervienen generalmente en el tratamiento de aguas destinadas al abastecimiento público y en la preparación de aguas industriales de fabricación. Con estos procedimientos se consigue la neutralización de los coloides del agua y su adsorción en la superficie de los precipitados formados en el proceso de floculación. También pueden adsorberse sobre el flóculo ciertas sustancias disueltas (materia orgánica, contaminantes diversos...).

En el tratamiento de aguas residuales urbanas, con frecuencia es tal la concentración de materia en suspensión que puede conseguirse una floculación mediante simple agitación. Con el fin de favorecer la eliminación de la contaminación coloidal, puede introducirse un coagulante.

Las aguas residuales industriales presentan composiciones muy variables, según la industria considerada. En algunos casos, el agua contiene un constituyente capaz de flocular por simple agitación o que lo hace mediante la adición de un floculante; otras veces, es necesario utilizar un coagulante que de origen a un precipitado que pueda flocularse a continuación.



## 2. COAGULACIÓN

La coagulación consiste en introducir en el agua un producto capaz:

- de neutralizar la carga de los coloides generalmente electronegativos, presentes en el agua,
- de formar un precipitado.

Este producto se conoce con el nombre de coagulante

### 2.1. Principales coagulantes

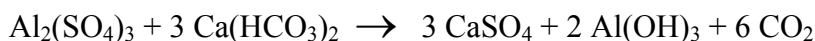
Los coagulantes principalmente utilizados son sales de aluminio o de hierro. En algunos casos, pueden utilizarse igualmente productos de síntesis, tales como los polielectrólitos catiónicos.

La sal metálica actúa sobre los coloides del agua por medio del catión, que neutraliza las cargas negativas antes de precipitar.

Al polielectrólito catiónico se le llama así porque lleva cargas positivas que neutralizan directamente los coloides negativos. Los polielectrólitos catiónicos se emplean generalmente junto con una sal metálica, en cuyo caso permiten una importante reducción de la dosis de dicha sal que habría sido preciso utilizar. Puede llegarse incluso a suprimir completamente la sal metálica, con lo que se consigue reducir notablemente el volumen de fango producido.

#### 2.1.1. SALES DE ALUMINIO

1.º Sulfato de aluminio (forma líquida o sólida):



Dosis: en clarificación, 10 a 150 g/m<sup>3</sup> (expresada en producto comercial) según la calidad del agua bruta.

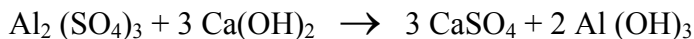
En tratamiento de aguas residuales, de 100 a 300 g/m<sup>3</sup>, según la calidad del agua residual y la exigencia de calidad.

2.º Cloruro de aluminio (forma líquida):

De empleo excepcional.



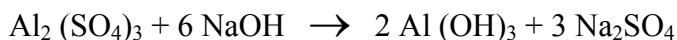
3.º Sulfato de aluminio + cal:



Dosis: en clarificación, se necesita, de cal Ca(OH)<sub>2</sub>, un tercio de la dosis de sulfato de alúmina comercial Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, 18 H<sub>2</sub>O.

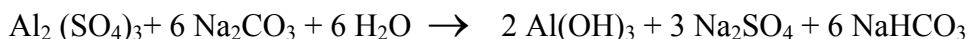
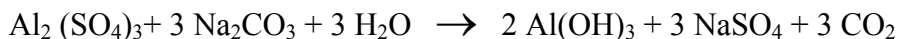
En tratamiento de aguas residuales urbanas, se necesitan 100 a 200 g/m<sup>3</sup> de cal por 150 a 500 g/m<sup>3</sup> de sulfato de alúmina comercial.

4.º Sulfato de aluminio + sosa cáustica:



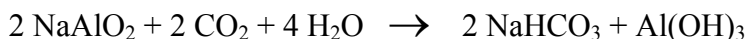
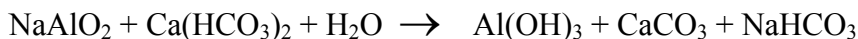
Dosis: En clarificación, se necesita, de sosa cáustica NaOH, el 36 % de la dosis de sulfato de aluminio comercial Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, 18 H<sub>2</sub>O.

5.º Sulfato de aluminio + carbonato sódico:



Dosis: Se necesita, de sosa Solvay, entre el 50 y el 100% de la dosis de sulfato de aluminio comercial  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 18  $\text{H}_2\text{O}$ .

#### 6.º Aluminato sódico:



Dosis: En clarificación, 5 a 50  $\text{g}/\text{m}^3$  de reactivo comercial del 50 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

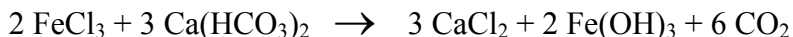
#### 7.º Polímeros de aluminio:

En ciertas condiciones, las sales de aluminio pueden condensarse, llegando a la formación de polímeros capaces de coagular y flocular. Se forma así el policloruro básico de aluminio (PCBA), neutralizando progresivamente con sosa una solución de cloruro de aluminio.

Se obtienen polímeros de la forma  $\text{Al}_6(\text{OH})^{6+}_{12}$  a  $\text{Al}_{54}(\text{OH})^{8+}_{144}$ , cuyas propiedades coagulantes y floculantes son excepcionales. El PCBA ha de prepararse en el mismo lugar de su utilización (procedimiento patentado). Por el contrario, otros productos (comercializados con diversas marcas, tales como WAC) pueden prepararse y almacenarse durante un largo período, como consecuencia de la estabilidad aportada al polímero por la adición de diversos productos (aniones de ácidos fuertes, como  $\text{SO}^{2-}_4$ ...).

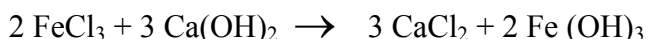
### 2.1.2. SALES DE HIERRO

#### 1.º Cloruro férrico (generalmente en forma líquida, a veces cristalizado)



Dosis: En clarificación, 5 a 150  $\text{g}/\text{m}^3$  de cloruro férrico comercial  $\text{FeCl}_3$ , 6  $\text{H}_2\text{O}$ . En tratamiento de aguas residuales urbanas, 100 a 500  $\text{g}/\text{m}^3$  de cloruro férrico comercial  $\text{FeCl}_3$ , 6  $\text{H}_2\text{O}$ .

#### 2.º Cloruro férrico + cal:



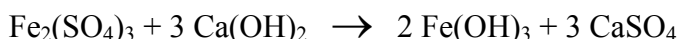
Dosis: En tratamiento de aguas residuales urbanas, se necesitan 100 a 800  $\text{g}/\text{m}^3$  de cal para dosis de 100 a 600  $\text{g}/\text{m}^3$  de cloruro férrico comercial  $\text{FeCl}_3$ , 6  $\text{H}_2\text{O}$ .

#### 3.º Sulfato férrico:



Dosis: En clarificación, se necesitan 10 a 150  $\text{g}/\text{m}^3$  de reactivo comercial  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , 9  $\text{H}_2\text{O}$ .

#### 4.º Sulfato férrico + cal:



Dosis: En clarificación, se necesita, de cal  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el 40 % de la dosis de sulfato férrico  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , 9  $\text{H}_2\text{O}$ .

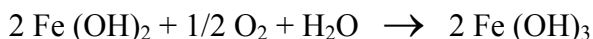
#### 5.º Sulfato ferroso:



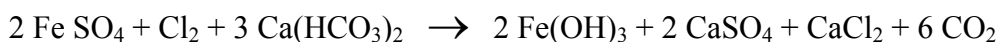
Dosis: En clarificación, se necesitan de 10 a 100 g/m<sup>3</sup> de reactivo comercial FeSO<sub>4</sub>, 7 H<sub>2</sub>O.

En tratamiento de aguas residuales, se necesitan de 200 a 400 g/m<sup>3</sup> de reactivo comercial FeSO<sub>4</sub>, 7 H<sub>2</sub>O.

En aguas aireadas, el hidróxido ferroso se oxida a hidróxido férrico:

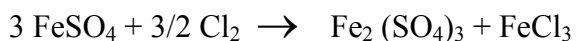


6.º Sulfato ferroso + cloro:

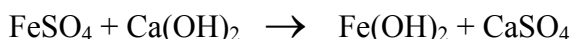


Dosis: Se necesita, de cloro, el 12 % de la dosis de sulfato ferroso FeSO<sub>4</sub>, 7 H<sub>2</sub>O.

El sulfato ferroso y el cloro pueden introducirse separadamente en el agua a tratar, o bien puede oxidarse una solución de sulfato ferroso con cloro, antes de su utilización. Se obtiene entonces una mezcla de sulfato y cloruro férrico, a la que se le conoce comercialmente con el nombre de clorosulfato férrico, según la reacción:



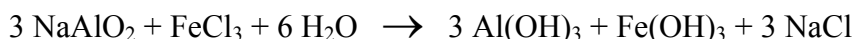
7.º Sulfato ferroso + cal:



Dosis: En clarificación, se necesita, de cal Ca(OH)<sub>2</sub>, el 26 % de la dosis de sulfato de hierro FeSO<sub>4</sub>, 7 H<sub>2</sub>O

En tratamiento de aguas residuales, se necesitan de 100 a 150 g/m<sup>3</sup> de cal para dosis de 250 a 350 g/m<sup>3</sup> de sulfato ferroso.

8.º Cloruro férrico + aluminato sódico:



Dosis: Se necesita tanto aluminato sódico comercial del 50 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como cloruro férrico comercial FeCl<sub>3</sub>, 6 H<sub>2</sub>O.

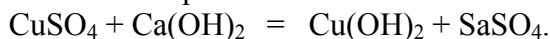
### 2.1.3. OTROS COAGULANTES

1.º Sulfato cúprico:



Dosis: 5 a 20 g/m<sup>3</sup> (empleo excepcional).

2.º Sulfato cúprico + cal:



Dosis: se necesitan 30 g de cal Ca(OH)<sub>2</sub> por cada 100 g de sulfato cúprico CuSO<sub>4</sub>, 5 H<sub>2</sub>O (empleo excepcional)

3.º Ozono:

El ozono no es coagulante en el sentido propio de la palabra, puesto que no ejerce acción alguna sobre las cargas eléctricas de los coloides del agua.

Sin embargo, en algunos casos bien definidos, cuando una agua contiene complejos que ligan las materias orgánicas al hierro o al manganeso, puede suceder que el ozono actúe

como ayudante de coagulación. Por una parte, se comprueba la destrucción por el ozono de estos complejos, y, por otra, la oxidación de los iones metálicos así liberados. Si se alcanzan las condiciones de pH requeridas, se formará un precipitado, generalmente frágil y poco voluminoso. Las características de densidad y de cohesión del flóculo formado son insuficientes para que se consiga una decantación aceptable, pero puede realizarse una coagulación sobre filtro.

## **2.2. Práctica de la coagulación**

### **2.2.1. ELECCIÓN DEL COAGULANTE**

La elección del coagulante se efectuará después de un estudio del agua en laboratorio, mediante la técnica de ensayos de floculación (v. capítulo 27, pág. 949). En esta elección deben tenerse en cuenta diversos factores:

- naturaleza y calidad del agua bruta,
- variación de la calidad del agua bruta (variaciones diarias o según las estaciones, en especial, influencia de la temperatura),
- criterios de calidad y destino del agua tratada,
- tratamiento previsto después de la coagulación (coagulación sobre filtro, decantación),
- grado de pureza del reactivo, especialmente en el caso de aguas para abastecimiento público. Para este uso se excluyen los productos de recuperación, subproductos de fabricación, etc...

### **2.2.2. INTRODUCCIÓN DEL COAGULANTE**

Teniendo en cuenta que la neutralización de los coloides es el principal objetivo que se pretende en el momento de la introducción del coagulante, es conveniente que el reactivo utilizado se difunda con la mayor rapidez posible.

En efecto, el tiempo de coagulación es extraordinariamente breve (inferior al segundo) y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización de los coloides sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar (por ejemplo, en forma de hidróxido metálico).

Para la mezcla de los reactivos, se utiliza a veces únicamente la turbulencia creada por un vertedero, pero conviene disponer de un sistema que permita esta mezcla rápida, sistema denominado mezclador rápido o coagulador, y que sea capaz de crear un gradiente de velocidad comprendido entre 100 y 1000<sup>s-1</sup>.

No son indispensables los mezcladores rápidos cuando se utiliza un decantador por contacto de fango, mientras que sí lo son en caso de floculación difusa.

Se distinguen varios tipos de mezcladores:

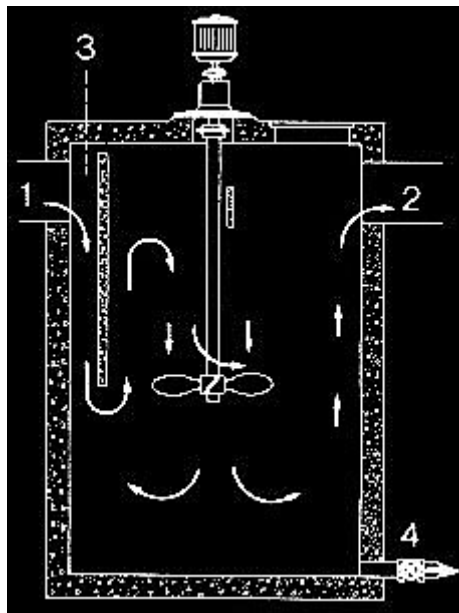
- Mezcladores estáticos:

Se trata de dispositivos colocados en el interior de una tubería (sistema helicoidal, diafragma, cono...) que crean una turbulencia suficiente para permitir la difusión instantánea del coagulante.

Estos mezcladores producen una pérdida de carga a veces importante. Son muy eficaces al caudal nominal, pero su eficacia decrece cuando disminuye el caudal que pasa por la tubería.

- Mezcladores rápidos:

Se trata de un agitador rápido del tipo de hélice o de palas (turbina), colocado en una cámara de mezcla especial (ver figura 69).



**Fig. 69.** Cámara de mezcla con agitador rápido.

- 1 - Entrada de agua.
- 2 - Salida de agua.
- 3 - Reactivo.
- 4 - Vaciado.

### 3. FLOCULACIÓN

El coagulante introducido da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen su peso y sobre todo su cohesión. Se favorecerá el engrosamiento del flóculo por medio de:

- una coagulación previa tan perfecta como sea posible,
- un aumento de la cantidad del flóculo en el agua; conviene poner el agua en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior

(recirculación de fangos lecho de fango), tratando de conseguir la mayor concentración posible,

- una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula de flóculo,
- el empleo de ciertos productos llamados floculantes.

### 3.1. Floculantes

Los floculantes, llamados también ayudantes de coagulación, ayudantes de floculación e incluso ayudantes de filtración, son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o al nivel de la calidad del flóculo (flóculo más pesado, más voluminoso y más coherente).

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (minera u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico).

#### 3.1.1. SÍLICE ACTIVADA

La sílice activada fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza juntamente con sulfato de alúmina.

Se introduce generalmente después del coagulante, y se prepara neutralizando parcialmente la alcalinidad de una solución de silicato sódico.

#### · Preparación de la sílice activada

##### 1. En laboratorio o en fabricación industrial

###### a) Método Baylls

- Partir de 25 ml o 35 g de silicato sódico de 41° Bé (28 % de  $\text{SiO}_2$ ). Completar hasta 500 ml con agua.
- Añadir lentamente, y agitando, 170 ml de agua que contenga 2,4 ml de ácido sulfúrico de 66 Bé.
- Agitar lentamente durante 2 h.
- Completar hasta 2 l.
- La solución así obtenida contiene un 0,5 % de  $\text{SiO}_2$ .

###### b) Método Hay

- Partir de 25 ml o 35 g de silicato sódico de 41° Bé (28% de  $\text{SiO}_2$ ). Completar hasta 400 ml con agua.
- Añadir lentamente, y agitando, 6,7 g de sulfato amónico disuelto en 100 ml de agua.
- Agitar lentamente durante 2 h.
- Completar hasta 1 l.
- La solución obtenida contiene un 1 % de  $\text{SiO}_2$ .

Esta solución es más estable que la obtenida por el método Baylis. La presencia de sales de amonio hace difícil la aplicación del método Hay cuando existe una precloración. En los dos métodos descritos anteriormente, la preparación industrial requiere precauciones especiales. c) También puede «activarse» el silicato sódico con ácido clorhídrico, cloro, ácido carbónico, bicarbonato sódico, etc., en la dosis necesaria para neutralizar el 90 % de su alcalinidad.

## 2. Preparación en continuo:

Industrialmente, en grandes instalaciones, se prefiere dosificar las soluciones de silicato sódico y de ácido de forma continua. Se mezclan estas dos soluciones en un depósito que lleva, eventualmente, una llegada de agua para que pueda conseguirse la concentración deseable de  $\text{SiO}_2$ , y, a continuación, se hace pasar la solución a un depósito de envejecimiento, con un tiempo de permanencia de media hora.

Para distribuir 1 kg de  $\text{SiO}_2$  por hora, se necesitan aproximadamente: 2,5 l/h de silicato sódico 41° Bé y 0,24 l/h de ácido sulfúrico 66° Bé ó 850 g/h de bicarbonato sódico, y completar hasta 100 l/h con agua de aportación.

Controlar regularmente la neutralización del silicato sódico por medio de la determinación del TA y del TAC de la solución de sílice activada. El TAC de la solución al 1 % de  $\text{SiO}_2$  debe ser del orden de 50 a 75 grados franceses.

### 3.1.2. OTROS FLOCULANTES MINERALES

A veces se utilizan ciertos productos para cargar un agua bruta que no contiene suficiente materia en suspensión.

Entre ellos, pueden citarse:

- algunas arcillas,
- blanco de Meudon o carbonato cálcico precipitado,
- carbón activo en polvo (cuando se impone este tratamiento),
- arena fina, kieselguhr (diatomeas).

### 3.1.3. FLOCULANTES ORGÁNICOS

El progreso de la Química Orgánica ha permitido el desarrollo de otros floculantes más activos.

1.º Origen:

\*Algunos se fabrican a partir de productos naturales: alginatos (extractos de algas), almidones (extractos de granos vegetales), derivados de la celulosa, ciertas gomas... Los alginatos se utilizan especialmente como ayudantes de floculación de las sales férricas, aunque a veces, también dan buenos resultados con sales de aluminio.



Se obtienen a partir del ácido alginico, el cual, a su vez, se extrae de algas marinas (en especial, del género Laminaria). Su empleo en el tratamiento de aguas de abastecimiento público, está autorizado en todos los países.

\*Otros floculantes son totalmente sintéticos. Se distinguen, por una parte, las poliacrilamidas, de larga cadena y gran masa molar ( $2 \text{ a } 4 \cdot 10^6 \text{ g/mol}$ ), y, por otra, las poliaminas, que tienen, generalmente, cadenas más cortas y menores masas molares ( $1 \cdot 10^6 \text{ g/mol}$ ).

Las poliacrilamidas se utilizan en el tratamiento de clarificación de aguas y en la deshidratación de fangos, mientras que las poliaminas se emplean sobre todo en clarificación.

## 2.º Empleo:

Los floculantes orgánicos se descomponen en dos clases de empleo: productos sólidos y productos líquidos.

Existe gran cantidad de floculantes orgánicos, entre los cuales pueden citarse los siguientes: Praestol, Superfloc, Magnafloc, alginatos, Prosédim, Purifloc.

No hay ninguna regla que permita deducir a priori cuál de los floculantes dará mejores resultados, por lo que siempre deberán efectuarse ensayos de laboratorio. Asimismo, se determinará el tiempo que debe transcurrir entre la introducción del coagulante y la del floculante, factor éste que tiene gran importancia, por ejemplo, en el caso de la sílice activada.

Si bien los fabricantes, generalmente, facilitan los datos necesarios para la utilización óptima de sus productos, pueden seguirse, en líneas generales, las indicaciones que figuran en el cuadro.

En el caso de decarbonatación con cal, la elección debe orientarse hacia un floculante no iónico o aniónico.

En el caso de una clarificación, la elección debe hacerse entre un floculante no iónico, o ligeramente aniónico, y un floculante catiónico. Si el pH está próximo al de equilibrio, y en presencia de gran cantidad de materia orgánica, se ensayará, en primer lugar, un floculante catiónico.

Por último, en el caso de tratamiento de agua destinada al abastecimiento público, es indispensable tener en cuenta la legislación del país considerado, ya que el empleo de floculantes orgánicos está reglamentado; algunos países tienen publicada una lista de los productos autorizados. En Francia, con fecha 1.º de agosto de 1978, el Consejo Superior de Higiene no había autorizado, para las aguas potables, ningún producto orgánico de síntesis. En España, la Dirección General de Sanidad ha autorizado el uso de varios floculantes.

### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS FLOCULANTES ORGÁNICOS

Origen del producto		Almidón, algina- tos	Acrílicos sólidos	Acrílicos líquidos	Poliaminas
Almacenamiento, em- balaje		Sacos	Sacos o barriles	Bidones o cister- nas	Bidones
Manipulación		Pesada o dosifi- cadores en seco	Pesada o dosifi- cadores en seco	Dosificación por bidones enteros o por bomba dosificadora. Paso por gravedad o mediante aire comprimido (cisternas)	
Empleo	Preparación de una solu- ción madre	Difusor útil o ne- cesario. Concentración de la solución ma- dre: 0,5 a 1 %	Difusor indispen- sable. Concentración de la solución ma- dre: 0,3 a 0,5 %, excepcionalmente 1 %	Miscible en agua con agitador lento	
	Dosificación	Por bomba dosifi- cadora	Por bomba dosifi- cadora	Bombeo tal cual o en solución al 10 % (bomba dosificadora lenta, a causa de la viscosidad de la solución)	
Preparación de la solución de empleo		Dilución después de la dosificación	Dilución después de la dosificación	Dilución después de la dosifica- ción	
Concentración en la inyec- ción		1 a 3 %/an	0,5 a 2 %/an	Aproximadamente 1 %	
Tiempo de reacción		30 a 300 segun- dos, según el pro- ducto	20 a 120 segun- dos, según el pro- ducto	20 a 120 segundos, según el producto	

*Observaciones:*

1. Puede utilizarse un sistema de dilución en continuo (por ejemplo, hidroyector) para transportar el reactivo hasta el punto de destino.
2. Después de la inyección, no se debe bombear ni efectuar una agitación violenta.

### 3.2. Práctica de la floculación

La floculación será tanto mejor cuanto más eficaz sea la coagulación previa. El coagulador, en el que tiene lugar la agitación rápida, va seguido de un floculador, en el que se mantiene una agitación lenta durante 5 mm (agua residual muy cargada), o durante un tiempo mucho mayor en tratamiento de agua de abastecimiento público.

Esta agitación lenta puede tener lugar en un floculador separado, o bien en el interior del decantador propiamente dicho. En este caso, pueden utilizarse turbinas de recirculación, o la acción del propio lecho de fango (ver capítulo 7).

La elección del tipo de mezclador y del tipo de floculador está en estrecha relación con la elección del procedimiento de separación utilizado en la continuación del tratamiento. Debe estudiarse cuidadosamente esta elección, cuando la floculación es del tipo difuso y va seguida de una decantación estática, o de una flotación.

#### \*Floculadores:

La floculación se efectúa en este caso en depósitos provistos de sistemas de agitación que giran con relativa lentitud para no romper los flóculos ya formados, pero con la velocidad suficiente para conseguir el engrosamiento progresivo del flóculo e impedir que se formen sedimentos sobre el fondo del depósito.

El volumen de la cuba de floculación debe ser el necesario para que se consiga el tiempo de floculación determinado mediante ensayos de laboratorio.

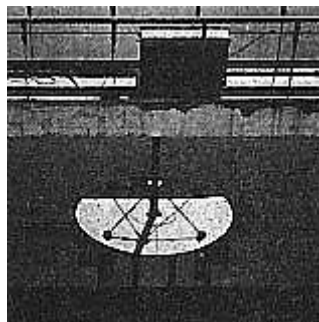
Los sistemas de agitación utilizados pueden estar constituidos por hélices especialmente estudiadas con este fin, o por un conjunto de palas fijadas sobre un eje giratorio, vertical u horizontal. Es conveniente obtener en el floculador un gradiente de velocidad comprendido entre 20 y  $50\text{s}^{-1}$ .

También conviene prever, en la transmisión del sistema de agitación, un conjunto motorreductor-variador, para que pueda regularse mejor la velocidad de agitación en función de la calidad de la floculación.

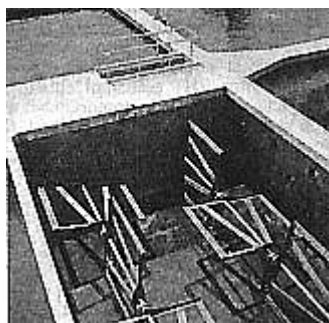
Si es grande el volumen necesario para la floculación, es preferible utilizar varios depósitos de pequeñas dimensiones, colocados en serie. En este caso, cada uno de los depósitos va provisto de un sistema de agitación independiente, cuya velocidad, regulable, puede adaptarse mejor a la calidad de la floculación.

Por último, es importante que no se rompa el flóculo al pasar del floculador a la zona de decantación. Según la calidad del agua tratada, las velocidades de paso deberán limitarse a los siguientes valores:

- flóculo de hidróxido metálico frágil:  $v = 0,20 \text{ m/s}$
- flóculo de hidróxido metálico resistente:  $v = 0,50 \text{ m/s}$
- flóculo de aguas residuales:  $v = 1 \text{ m/s}$ .



**Fig. 70.** - Floculador vertical



**Fig. 77.** - Floculador horizontal