

## CAPÍTULO VII - 6. COAGULACIÓN

### ÍNDICE

---

COAGULACIÓN Y MEZCLA RÁPIDA .....	1
1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO .....	1
2. COLOIDES .....	3
3. COAGULANTES .....	10
4. MECANISMOS DE LA COAGULACIÓN .....	14
5. CALIDAD DEL AGUA CRUDA Y COAGULACIÓN.....	18
6. GRADIENTES DE VELOCIDAD .....	20
7. MEZCLA RÁPIDA .....	23
7.1. FACTORES A CONSIDERAR EN EL PROCESO .....	23
7.2. TIPOS DE MEZCLADORES.....	28
7.3. MEZCLA RÁPIDA HIDRÁULICA .....	29
7.4. MEZCLA MECÁNICA.....	47
7.5. MEZCLA NEUMÁTICA .....	53
7.6. INYECCIÓN DEL COAGULANTE Y LOCALIZACIÓN DE LA UNIDAD DE MEZCLA.....	55
8. BIBLIOGRAFÍA.....	58
9. ANEXO - CONDICIONES DE MEZCLA EN CANALETAS PARSHALL .....	59

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Tipos de coloides presentes en los sistemas naturales .....	<b>4</b>
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación.....	<b>19</b>
<b>Tabla 3.</b> Valores del coeficiente de Manning.....	<b>32</b>
<b>Tabla 4.</b> Valores de K .....	<b>34</b>
<b>Tabla 5.</b> Dimensiones normalizadas de Canaletas Parshall (mm) .....	<b>40</b>
<b>Tabla 6.</b> Valores de k y n para la ecuación 19 .....	<b>41</b>
<b>Tabla 7.</b> Turbinas de flujo radial con 6 paletas.....	<b>50</b>

## FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Carga y variación del potencial en las proximidades de una partícula coloidal.....	<b>5</b>
<b>Figura 2.</b> Fuerzas que actúan sobre una partícula coloidal .....	<b>7</b>
<b>Figura 3.</b> Variación del potencial zeta con la concentración iónica.....	<b>9</b>
<b>Figura 4.</b> Esquema de las reacciones de coagulación con sulfato de aluminio (adaptado de Amirtharajah – The Use of Chemicals for Coagulation – 1985).....	<b>15</b>
<b>Figura 5.</b> Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad (adaptado de Amirtharajah – The Use of Chemical Coagulation – 1985).....	<b>16</b>
<b>Figura 6.</b> Gradiente de velocidad y colisión entre partículas.....	<b>20</b>
<b>Figura 7.</b> Ensayos de mezcla incompleta (mezcla en volúmenes parciales).....	<b>24</b>
<b>Figura 8.</b> Influencia de la dilución del coagulante (sulfato de aluminio) en la coagulación (Planta II - Foz de Iguazú).....	<b>26</b>
<b>Figura 9.</b> Efecto de la dilución de coagulante sobre la turbiedad del agua decantada. Determinación óptima de coagulante (Planta Gral. San Martín, Buenos Aires) .....	<b>27</b>
<b>Figura 10.</b> Influencia de la clase y concentración (dilución) del coagulante (Planta de tratamiento de Vale Esperança, Vitória (ES), Brasil) .....	<b>28</b>
<b>Figura 11.</b> Tipos de mezcladores hidráulicos .....	<b>31</b>
<b>Figura 12.</b> Resalto en canal por cambio de pendiente .....	<b>37</b>
<b>Figura 13.</b> El resalto hidráulico en la canaleta Parshall.....	<b>40</b>
<b>Figura 14.</b> Resalto en un vertedero rectangular .....	<b>44</b>
<b>Figura 15.</b> Tipos básicos de turbinas.....	<b>48</b>
<b>Figura 16.</b> Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para algunos tipos de turbinas .....	<b>48</b>
<b>Figura 17.</b> Relaciones geométricas entre la cámara y la turbina tipo 1 .....	<b>49</b>
<b>Figura 18.</b> Mezclador mecánico en línea.....	<b>52</b>
<b>Figura 19.</b> Principio de los difusores.....	<b>55</b>
<b>Figura 20.</b> Difusor en un resalto .....	<b>56</b>
<b>Figura 21.</b> Punto de aplicación del coagulante en la mezcla rápida con una turbina de flujo radial....	<b>57</b>



## COAGULACIÓN Y MEZCLA RÁPIDA

El proceso de coagulación, utilizado en la mayoría de las plantas de tratamiento, consiste en la aplicación de productos químicos para la desestabilización de suspensiones coloidales de partículas sólidas, que de otra manera, no podrían ser removidas por sedimentación, flotación o filtración. El proceso permite asimismo la adsorción y la precipitación de compuestos en solución.

### 1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO

En la bibliografía sobre tratamiento de agua, se encuentran diferentes interpretaciones a los términos “coagulación” y “floculación”, frecuentemente aplicados como sinónimos.

En una acepción amplia, estos procesos constituyen la alteración físico-química de partículas coloidales de un agua, caracterizada principalmente por color, turbiedad y su aglomeración, para producir partículas que puedan removerse a continuación mediante un proceso físico de separación, usualmente la sedimentación.

El proceso completo se desarrolla en dos fases. La primera – la coagulación propiamente dicha – comprende la adición de coagulantes químicos con la finalidad de desestabilizar los coloides en suspensión.

La segunda fase – la floculación – promueve colisiones entre las partículas previamente desestabilizadas en la coagulación, por efecto del transporte de fluido, formando partículas de mayor tamaño, visibles a la vista: los flóculos.

Puede indicarse que el proceso completo constituye una secuencia continua y que la floculación se inicia en cuanto estén formados, como consecuencia de la coagulación, los primeros “micro flóculos”.

Es importante destacar que la coagulación y la floculación son parte de los procesos que integran una planta de filtración rápida. La forma como se lleven a cabo estos procesos tiene definida incidencia sobre la eficiencia total de la planta.

La coagulación se realiza inicialmente, mediante la mezcla rápida del coagulante con el agua y seguidamente, la floculación mediante agitación lenta del material coagulado para la formación de los flóculos. La mezcla rápida y la mezcla lenta son, básicamente procesos de transporte, asociados a la precipitación y unión de partículas primarias. Como fenómenos de transporte, la diferencia entre las dos reside en el tiempo e intensidad de la mezcla, ésta definida por el gradiente de velocidad.

Los coagulantes usuales incluyen sales de aluminio o de hierro. El coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio -  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ . En aplicaciones específicas es común la adición de polímeros y en menor grado sílice activada y bentonita, como auxiliares de coagulación.

El pH de coagulación es un parámetro crítico en la eficiencia del proceso. Como el pH resultante depende del coagulante utilizado, de la dosis aplicada y de la alcalinidad

presente, se debe conocer esos datos para optimizar el proceso, lo que generalmente se lleva a cabo mediante ensayos de coagulación en el laboratorio a través de pruebas de jarras o “jar-test”.

En instalaciones de tratamiento más importantes, es conveniente el monitoreo de la cantidad de coagulante aplicada por medio de la medición de la capacidad de carga de los coloides -CCC-, principalmente en la coagulación por neutralización de carga.

La temperatura influye en la coagulación por su acción en la constante de equilibrio del agua, haciendo variar el pOH para un dado pH de coagulación. En la mezcla y floculación, la variación de la viscosidad con la temperatura, altera los gradientes de velocidad aplicados, haciendo necesario realizar correcciones para mantener o mejorar la eficiencia del proceso.

En la coagulación, la estabilidad de los coloides y su carga superficial – o potencial Zeta -, juega un papel decisivo.

En la mezcla rápida, las reacciones de hidrólisis y precipitación que tienen lugar al adicionar el coagulante son prácticamente instantáneas y son seguidas por una fase muy rápida donde sucede una floculación pericinética, en la cual las partículas sólidas primarias crecen hasta un tamaño límite del orden de 10 micrones. Esa aglomeración de partículas por floculación pericinética está dominada por el movimiento Browniano, resultado del fenómeno de difusión.

En lo que respecta a la mezcla lenta, el conocimiento de la cinética de la floculación es un parámetro fundamental en el dimensionamiento de los floculadores.

## 2. COLOIDES

Un coloide es una dispersión de pequeñas partículas de un material en otro. Los coloides se clasifican como:

- **Sol** : una dispersión de un sólido en un líquido o de un sólido en un sólido.
- **Emulsión** : una dispersión de un líquido en un líquido.
- **Aerosol** : una dispersión de un líquido o un sólido en un gas.

Específicamente para el agua como solvente, un sólido puede ser hidrófobo, significando que repele el agua o hidrófilo que tiene afinidad por ella.

En una dispersión coloidal, la fase dispersa es grande comparada con las moléculas, pero tan pequeña que las fuerzas de superficie, así como las inerciales, son significativas en la estabilidad y otras propiedades de la dispersión.

El tamaño de las partículas coloidales se sitúa en un intervalo comprendido entre  $0,001\ \mu\text{m}$  y  $1\ \mu\text{m}$  ( $10^{-6}$  y  $10^{-3}$  mm). Las partículas coloidales como las arcillas, que presentan una forma laminar, alcanzan los  $20\ \mu\text{m}$  con un espesor de apenas  $0,01 - 0,02\ \mu\text{m}$ . La menor dimensión caracteriza el comportamiento coloidal de la partícula, confiriéndole una gran superficie por unidad de volumen, o sea una gran superficie específica.

Todas las partículas coloidales poseen una carga eléctrica que produce una fuerza de repulsión mutua mayor que las fuerzas moleculares de cohesión, la cual es suficientemente grande para mantenerlas separadas y en suspensión. Reduciendo o neutralizando su carga, las partículas coloidales se pueden acercar y aglomerar progresivamente, debido a fuerzas moleculares de cohesión, posibilitando su remoción posterior por medios físicos. Este es el objetivo de la coagulación.

Los coloides están omnipresentes en las aguas naturales. La **Tabla 1**, adaptada de Stumm y Morgan (1996), muestra los tipos de coloides existentes en sistemas acuáticos. Estos coloides presentan siempre una gran estabilidad o resistencia a la aglomeración natural que impide su separación por sedimentación, filtración u otros procesos físicos de clarificación.

Las partículas coloidales de origen mineral en general no implican riesgo para el consumo humano.

Normalmente la única objeción a los coloides de origen mineral reside en consideraciones estéticas debido a la turbiedad resultante de su presencia. Sin embargo, los coloides minerales pueden absorber materia orgánica, bacterias y virus, protegiendo microorganismos patógenos de la acción de los desinfectantes.

La mayor parte de la materia orgánica es de origen natural, originada por la degradación de vegetales y animales, que comunica al agua turbiedad y principalmente color. Su remoción es necesaria porque puede vehiculizar sustancias tóxicas como los pesticidas y reaccionar con el cloro produciendo subproductos sospechosos de ser cancerígenos.

- 1 Partículas de Origen Fluvial
  - Productos de desintegración y coloides del suelo (por ejemplo: silicatos de aluminio, caolinita, gibbsita,  $\text{SiO}_2$ )
  - Óxidos de Hierro (III) y Manganeseo (III, IV)
  - Fitoplancton, residuos biológicos, humus coloidal (ácido húmico coloidal), fibrilas<sup>a</sup>
  - Hierro (III) supuestamente disuelto, por lo tanto constituido principalmente de óxidos de  $\text{Fe}^{+3}$  estabilizados por ácidos húmicos y fúlvicos
- 2 Partículas del Suelo
  - Partículas de caolinita. Cerca de 50 capas de láminas hexagonales acumuladas irregularmente
  - Illita y otros componentes de arcilla. Partículas laminares acumuladas irregularmente
  - Esmectita y vermiculitas, que tienen menos tendencia a aglomerarse
  - Humus, ácidos húmicos coloidales, fibrilas
  - Óxidos hidratados de hierro
  - Coberturas poliméricas de partículas del suelo por humus, óxidos hidratados de hierro (III), e compuestos hidróxido-Al (III)
- 3 Coloides en sedimentos
  - Además de los coloides mencionados arriba: sulfatos y polisulfatos en sedimentos anóxicos
  - Coloides de Origen Orgánico y Biológico
  - Microorganismos, virus, biocoloides, fibrilas; aglomeración de exudados y materia orgánica macromolecular

<sup>a</sup> Las fibrilas son coloides orgánicos alargados con un diámetro de 2-10 nm, parcialmente compuestos de polisacáridos.

**Tabla 1.** Tipos de coloides presentes en los sistemas naturales

Las aguas naturales también contienen una serie de partículas de origen biótico, incluyendo algas, protozoarios, bacterias y virus. Estos deben ser removidos o inactivados para la potabilización del agua. La presencia de algas puede producir además serias perturbaciones en el tratamiento del agua.

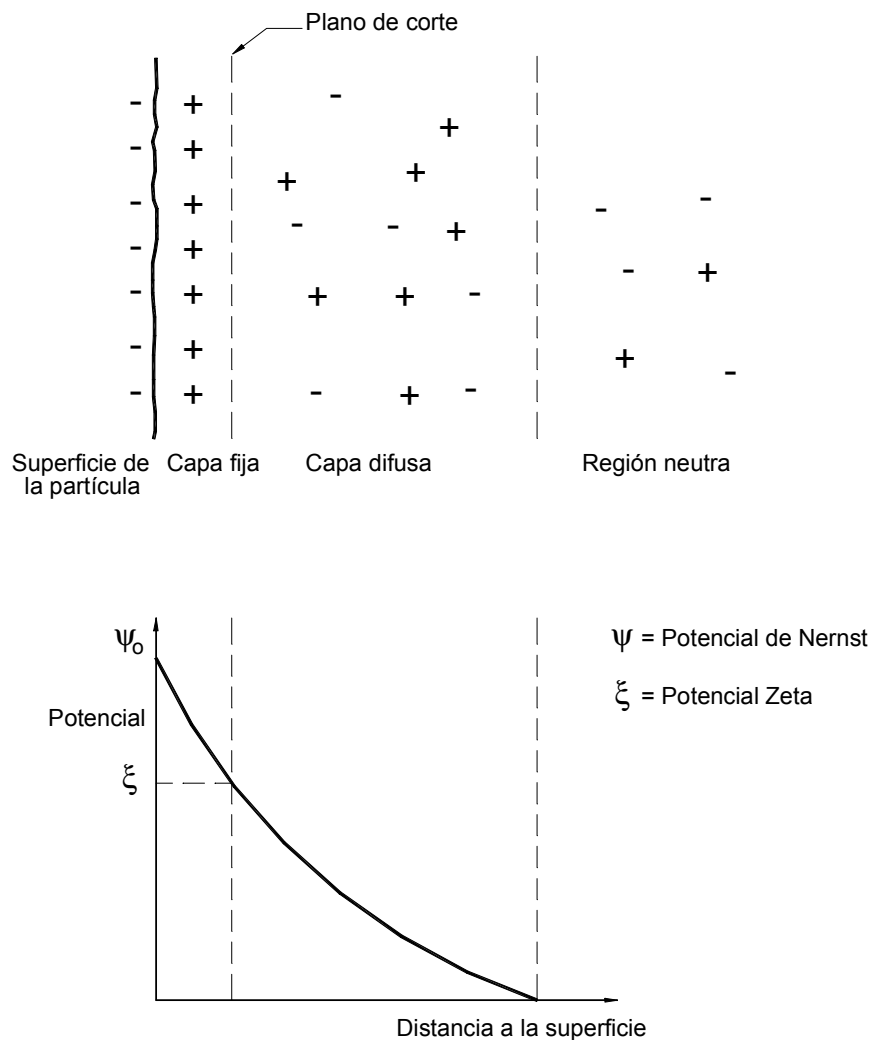
Los coloides presentes en sistemas acuáticos naturales presentan en su mayoría, una carga eléctrica negativa. La carga de las partículas tiene origen en:

- 1). La disociación de las sustancias que constituían la estructura del cristal natural.
- 2). Las reacciones químicas en la superficie.
- 3). La adsorción de iones.

Debido a la presencia de estas cargas negativas en la superficie de los coloides, los iones de igual carga (co-iones) son repelidos y los iones de carga opuesta (contra iones) son fuertemente adsorbidos en una capa inmediatamente adosada a la superficie de la partícula, formando una capa interna firmemente adherida (capa fija). Se forma además otra capa con contra iones, mantenida próxima a la superficie de la partícula, por las fuerzas electrostáticas (capa difusa).

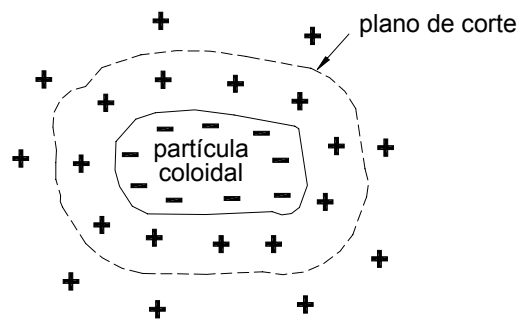
La concentración de los contra iones decrece exponencialmente a partir de la superficie hasta igualar la concentración en la solución. La diferencia de potencial eléctrico entre un punto inmediatamente fuera de la superficie de la partícula hasta donde la concentración

iónica iguala a la de la solución, cae gradualmente a medida que se aleja de la superficie, como se ve en la **Figura 1**.



**Figura 1.** Carga y variación del potencial en las proximidades de una partícula coloidal

Cuando una partícula coloidal se mueve libremente en el líquido arrastra la capa fija de contra iones (plano de corte).



Al no igualarse las cargas de la superficie de la partícula con las de la capa fija, la partícula de su conjunto queda con una carga total negativa.



En las partículas coloidales en suspensión esas cargas totales adquieren por el tamaño de las partículas, una significativa importancia al ser mayores que el peso y que las fuerzas de atracción moleculares, siendo las causantes de la estabilidad del sistema coloidal (o sea su incapacidad de separarse del líquido por decantación).

A continuación se explica en detalle estos aspectos.

### **Aspectos Físicos de un Sistema Coloidal**

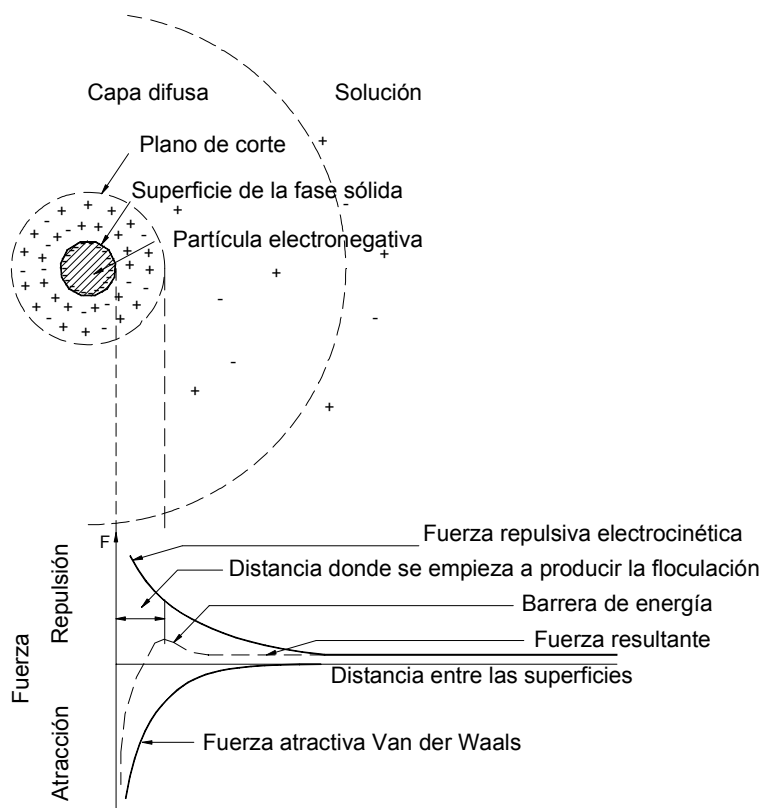
Como se ha visto, las partículas coloidales en movimiento en una solución se rechazan entre sí debido a sus cargas netas del mismo signo, tendiendo a mantenerse en suspensión. La fuerza de repulsión es mayor cuanto más cerca se encuentran las partículas como se indica en la **Figura 2**.

Existen además entre las partículas fuerzas de atracción molecular (Fuerzas de Van der Waals), que cuando se acercan tienden a mantenerlas unidas. Esa fuerza de atracción es más fuerte que la atracción electrostática cuando las partículas están muy cercanas, pero se anula rápidamente al alejarse (ver **Figura 2**).

En la **Figura 2** se representan ambas fuerzas y (en punteado) la fuerza total resultante.

Como puede observarse, esta fuerza resultante tiene un valor máximo en las cercanías del plano de corte, lo que corresponde a una barrera de energía. A distancias más cercanas que la barrera de energía la fuerza resultante es de atracción. A mayor distancia hay una fuerza resultante de repulsión.

La existencia de esta barrera de energía es la causa de la estabilidad del sistema coloidal. En efecto sólo cuando las partículas se acercan con una velocidad relativa suficientemente alta para pasar esta barrera de energía, las partículas se unen y quedan cohesionadas por las fuerzas de atracción de Van der Waals.



**Figura 2.** Fuerzas que actúan sobre una partícula coloidal

La velocidad de acercamiento es normalmente menor y por lo tanto prevalecen las fuerzas resultantes de repulsión debidas a la carga eléctrica.

Para desestabilizar un sistema coloidal es inicialmente necesario reducir la fuerza de repulsión electrostática, o sea el potencial zeta. De esta manera las fuerzas de Van der Waals provocan la adherencia de las partículas formando aglomerados, los que por su mayor tamaño tienen menor velocidad de sedimentación y pueden ser removidos por decantación.

### **Cálculo del potencial**

El cálculo de la diferencia de potencial en las cercanías de una partícula coloidal no es un problema fácil. No es posible medir el potencial en la superficie de la partícula, sin embargo es posible medir el potencial en el plano de corte que separa a la capa interna

de la capa difusa, llamado potencial electrocinético o potencial zeta, por medio de medidas electrocinéticas, siendo la más común la electroforesis.

De acuerdo a lo indicado el potencial zeta mide el potencial de una partícula en movimiento libre en el líquido.

Se denomina electroforesis al movimiento de partículas coloidales que arrastran parte de las cargas del líquido en un campo eléctrico. Así, pudiendo medir la velocidad de la partícula se determina la magnitud del potencial zeta, con la ecuación de Smoluchowski (1916), que por primera vez utilizó la movilidad electroforética para determinar el potencial zeta:

$$\zeta = \frac{4\pi \cdot \mu \cdot U}{E \cdot D} = 1,256 \cdot 10^5 \cdot \mu \frac{M}{D} \quad (\text{en mV}) \quad (1)$$

donde  $U$  = velocidad de la partícula,  $\mu\text{m/s}$  ( $10^{-6} \text{ m/s}$ )

$\mu$  = viscosidad dinámica del agua, poises (1 poise =  $0,0102 \text{ Kg.s/m}^2$ )

$E$  = potencial aplicado por unidad de longitud de la célula electroforética, volt/cm

$M = U/E$  = movilidad electroforética,  $(\mu\text{m/s})/(\text{V/cm})$

$D$  = constante dieléctrica del agua = 80,4 c.g.s.e a  $20^\circ\text{C}$  y 78,5 c.g.s.e a  $25^\circ\text{C}$

Las mediciones del potencial zeta se realizan utilizando el método llamado microelectroforesis, con un zetámetro. El zetámetro es un aparato constituido básicamente de la célula electroforética y de un microscopio estereoscópico.

Se llena la célula con una muestra a ser analizada, se aplica un campo eléctrico en el interior de la célula energizando los electrodos y se mide el tiempo que tardan las partículas para moverse a través de un reticulado de dimensiones conocidas, observando su movimiento con el microscopio y determinando de esta forma la movilidad electroforética.

Los zetámetros modernos incorporan un prisma rotativo cuya velocidad de rotación se ajusta de modo que las partículas parecen estacionadas en el interior de la célula.

### **Ejemplo 1**

En el análisis de agua cruda se aplicaron 50 V en los electrodos de una célula electroforética con 10 cm de longitud y una retícula de  $200 \mu\text{m}$  de espaciamiento. El tiempo medido para que una partícula recorra una división de la retícula fue de 30 segundos y la temperatura de la muestra  $25^\circ\text{C}$ . Determinar el potencial zeta.

**Solución:**

1) A  $25^\circ\text{C}$  :  $\mu = 0,009 \text{ poise}$

$D = 78,5$

$$U = 200\mu\text{m}/30\text{s} = 6,7 \mu\text{m}.\text{s}^{-1}$$

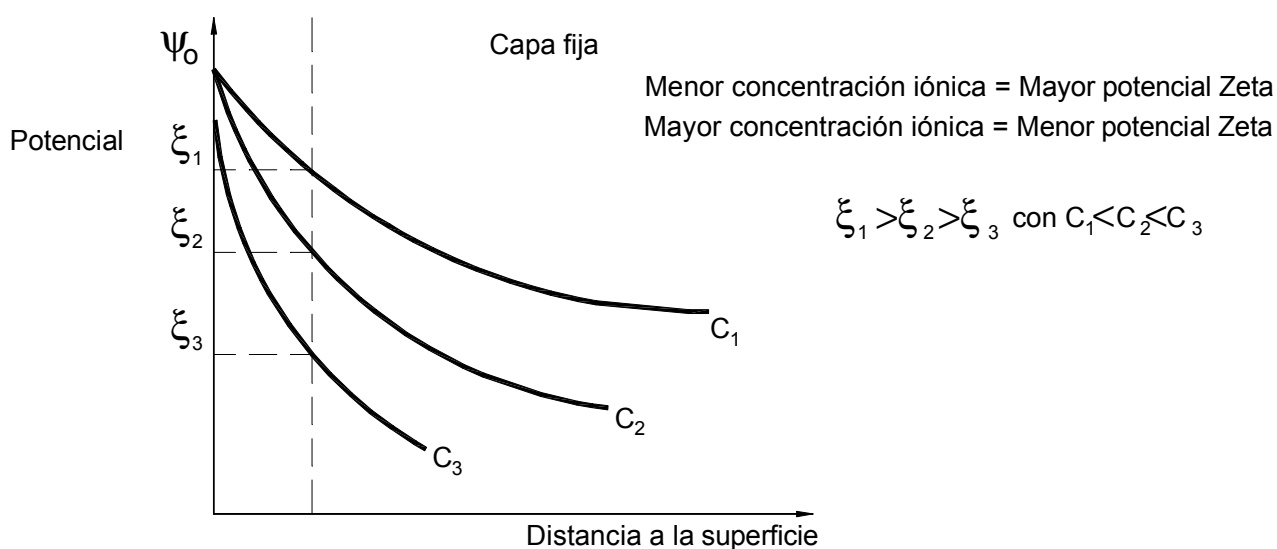
$$E = 50\text{V}/10\text{cm} = 5 \text{ V}.\text{cm}^{-1}$$

$$M = \frac{U}{E} = 6,7\mu\text{m}.\text{s}^{-1} / 5\text{V}.\text{cm}^{-1} = 1,3 \mu\text{m}.\text{s}^{-1} / \text{V}.\text{cm}^{-1}$$

2) Aplicando la ecuación (1), resulta:

$$\zeta = 1,256 \times 10^5 \times 0,009 \times 1,3 / 78,5 = 18,7 \text{ mV}$$

El potencial zeta es positivo cuando las partículas migran del polo positivo al negativo y negativo en el sentido contrario. Los coloides de las aguas naturales poseen generalmente potencial zeta negativo, variando entre -8 mV y -20 mV.



**Figura 3.** Variación del potencial zeta con la concentración iónica

El potencial zeta disminuye con el aumento de la concentración iónica en la capa difusa, como se muestra en la **Figura 3**, donde se observa una contracción de la capa difusa con el aumento de la concentración iónica. De esta forma se reducen las fuerzas de repulsión y se posibilita la aglomeración de las partículas mediante el aumento de la concentración electrolítica de la solución o por la neutralización de cargas con la adición de iones de carga opuesta, por medio de la incorporación de coagulantes metálicos y/o polielectrolitos.

### 3. COAGULANTES

El coagulante más utilizado en el tratamiento del agua es el sulfato de aluminio:  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ . En aguas de baja alcalinidad y mucho color es conveniente el empleo de aluminato de sodio -  $Na_2Al_2O_4$ .

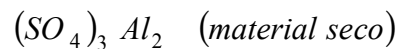
Los coagulantes férricos más utilizados son el sulfato férrico -  $Fe_2(SO_4)_3$  y el cloruro férrico -  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ .

#### **Sulfato de Aluminio**

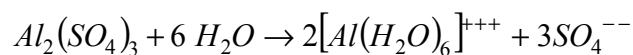
El sulfato de aluminio en solución es un ácido y es corrosivo, debiendo ser almacenado en tanques de madera, plomo o con revestimiento de goma, plástico, epoxy o acero inoxidable. Puede ser provisto seco, en terrones o en forma granular, o líquido (en solución).

El producto seco tiene un contenido de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) entre 14% a 18%. El producto líquido presenta un tenor de  $Al_2O_3$  normalizado en 8%, equivalente al 49% (36 grados Be) del producto seco o una concentración de  $660 \text{ Kg/m}^3$  con una densidad de  $1,33 \text{ g/cm}^3$ .

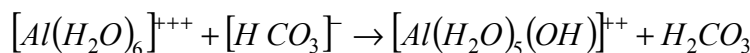
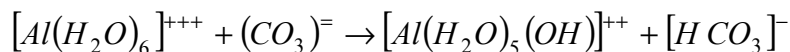
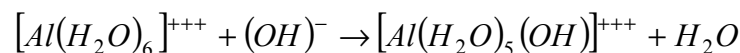
Las reacciones químicas que tienen lugar al adicionar sulfato de aluminio al agua se pueden simplificar como se describe a continuación:



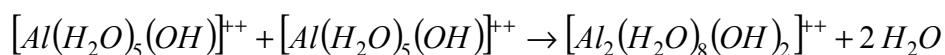
En solución se encuentra hidrolizado, o sea asociado con el agua.



#### **Reacciones con la alcalinidad del agua**



#### **Reacciones de polimerización**



Estas acciones de polimerización llevarían a productos tales como:

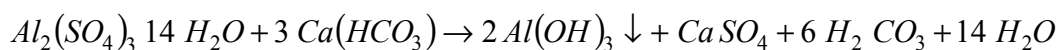


y otros más complejos (otros autores indican otros compuestos).

Según el Comité de la AWWA (1974), estas reacciones pueden representarse en forma iónica:

- 1).  $Al^{+++} + H_2O \leftrightarrow Al(OH)^{++} + H^+$
- 2).  $Al^{+++} + H_2O \leftrightarrow Al(OH)_2^+ + 2H^+$
- 3).  $Al^{+++} + H_2O \leftrightarrow Al(OH)_3^+ + 3H^+$
- 4).  $Al^{+++} + H_2O \leftrightarrow Al(OH)_4^- + 4H^+$

Si la alcalinidad natural es insuficiente se puede adicionar al agua cal viva o hidratada previamente al agregado de coagulante. En este caso la reacción resultante es:



Durante la coagulación el agua está supersaturada con los productos resultantes de las reacciones químicas del sulfato de aluminio con el agua y con la alcalinidad, los que precipitan rápidamente.

En síntesis, debido a las reacciones químicas se producen:

- Iones.
- Monómeros.
- Compuestos poliméricos (cadenas de monómeros).

Se señalan a continuación algunos aspectos importantes surgidos de las ecuaciones anteriores:

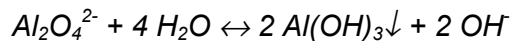
- Con el sulfato de aluminio comercial  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$ , 1 mg/l de este producto destruye 0,5 mg/l de alcalinidad y produce 0,44 mg/l de gas carbónico, ambos en términos de  $CaCO_3$ . Por lo tanto, debe haber alcalinidad suficiente para reaccionar con el sulfato de aluminio de modo de resultar una coagulación satisfactoria y también para mantener un residual adecuado en el agua tratada.
- 1 mg/l de sulfato de aluminio equivale a 0,091 mg/l en términos de  $Al^{3+}$
- 1 mg/l de sulfato de aluminio produce 0,26 mg/l de  $Al(OH)_3$ .

La solubilidad del sulfato de aluminio es función del pH y es más baja entre pH 5 y 7. Fuera de estos límites es impracticable la coagulación con sulfato de aluminio.

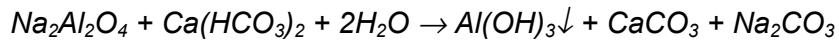
### **Aluminato de Sodio**

La forma sólida del aluminato de sodio contiene 70 a 90% de  $Na_2Al_2O_4$ . El aluminato líquido es una solución que contiene aproximadamente 32% de  $Na_2Al_2O_4$ , no corrosiva.

Contrariamente al sulfato de aluminio, las reacciones del aluminato de sodio son alcalinas en vez de ácidas liberando OH, en consecuencia elevando el pH.



En aguas naturales con alcalinidad se produce la siguiente reacción:



El aluminato tiene la ventaja de proveer tanto el coagulante como el alcalinizante en el mismo producto, siendo particularmente indicado para aguas de baja alcalinidad y color muy elevado, donde la dosis de sulfato de aluminio necesaria para la coagulación del color llevaría el pH a un valor fuera de sus límites de aplicación.

1 mg/l de aluminato de sodio equivale a 3,3 mg/l de sulfato de aluminio, pudiendo ser una alternativa viable en la sustitución del sulfato de aluminio y del alcalinizante en las condiciones descriptas más arriba, aumentando la alcalinidad en 0,54 mg/l en CaCO<sub>3</sub>.

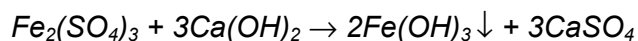
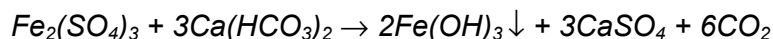
### Coagulantes Férricos

El sulfato férrico - Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·8H<sub>2</sub>O – es disponible tanto en forma líquida como sólida. En solución es corrosivo y debe ser almacenado con los mismos cuidados que el sulfato de aluminio. Como sólido es provisto en forma granular, con una composición en peso de 68 a 78% de Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y líquido en solución a 50% o 756 Kg/m<sup>3</sup> de concentración, con una densidad de 1,5. El cloruro férrico - FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, también se provee sólido o líquido. Los materiales adecuados para su manejo y almacenamiento son el PVC, PRFV (plástico reforzado con fibra de vidrio), polietileno, polipropileno, poliéster. Usualmente es provisto en solución al 42% en peso, densidad 1,46 y una concentración de 560 Kg/m<sup>3</sup>.

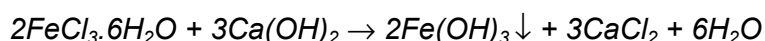
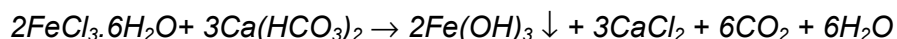
De modo general, todos los coagulantes férricos son eficientes entre amplios límites de pH, que va de 4 a 11 y son particularmente útiles para coagulación del color a bajos valores de pH, en la remoción de hierro y manganeso a altos valores de pH y en el proceso de ablandamiento para acelerar la formación de flóculos.

Las reacciones químicas con el agua son semejantes a las del sulfato de aluminio:

#### a) sulfato férrico



#### b) cloruro férrico



Los comentarios realizados para las reacciones con el sulfato de aluminio son válidos para los coagulantes férricos, pudiéndose mencionar que:

- 1). 1 mg/l de  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  y 1 mg/l de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  consumen respectivamente 0,75 y 0,56 mg/l de alcalinidad como  $\text{CaCO}_3$ .
- 2). 1 mg/l de sulfato férrico y 1 mg/l de cloruro férrico corresponden respectivamente a 0,28 y 0,21 mg/l de  $\text{Fe}^{+3}$
- 3). 1 mg/l de sulfato férrico produce 0,54 mg/l de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , mientras que 1 mg/l de cloruro férrico produce 0,40 mg/l de hidróxido.

Otro compuesto de hierro que también se puede utilizar es el sulfato ferroso -  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

El sulfato ferroso produce precipitado insoluble (hidróxido férrico) cuando el pH es ligeramente superior a 9. De este modo, el sulfato ferroso juntamente con la cal se utilizan a pH elevado, en procesos como en el ablandamiento (reducción de dureza) por el proceso de cal-soda o en la remoción de hierro y manganeso. En reacción con el cloro, el sulfato ferroso produce sulfato férrico y cloruro férrico, aplicándose para pH variables entre 4 y 11.

### **Coagulantes Orgánicos - Polímeros**

Se utilizan como auxiliares de la floculación o como coagulantes primarios. En este último caso el proceso de coagulación se reduce a la neutralización de cargas. La adición de un polímero no afecta el pH ni la alcalinidad.

La estructura molecular de un polímero consiste en una cadena de unidades químicas repetidas, unidas entre sí por interconexiones covalentes, resultando pesos moleculares entre 1000 a 5.000.000 o más. Cuando a lo largo de la cadena polimérica existen numerosos lugares con cargas eléctricas el polímero es denominado polielectrolito. De un modo general, se clasifica un polielectrolito como catiónico (con carga positiva), aniónico (con carga negativa) y no iónico.

Los polielectrolitos catiónicos, en la mayoría provistos en forma líquida con alta densidad de carga, son adecuados como coagulantes primarios.

Los polímeros de alto peso molecular no iónicos, aniónicos y catiónicos de baja densidad de carga son utilizados como auxiliares de coagulación.

La utilización de polímeros en la coagulación reduce sensiblemente la cantidad de lodo producida. Se los utiliza también en plantas de tratamiento de agua en la deshidratación de los lodos.

Los materiales adecuados para el almacenamiento y manejo de los polímeros son el plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), PVX y acero inoxidable 316.

Los polielectrolitos catiónicos son generalmente líquidos, con una densidad entre 1,0 y 1,3. Los no iónicos y aniónicos son generalmente sólidos, con una densidad entre 0,7 y 0,9. Presentan alta viscosidad y por ello deben ser diluidos adecuadamente antes de ser aplicados, generalmente entre 0,1 y 0,7%.

## 4. MECANISMOS DE LA COAGULACIÓN

Comprender los mecanismos de la coagulación es esencial para el proyecto racional de las unidades de mezcla rápida y floculación. Es oportuna, por lo tanto, una breve revisión de los aspectos más importantes de este fenómeno.

La coagulación tal como se ha indicado consiste como primer paso, básicamente en la desestabilización del sistema coloidal.

Los mecanismos disponibles para la desestabilización con el uso de coagulante son de dos tipos:

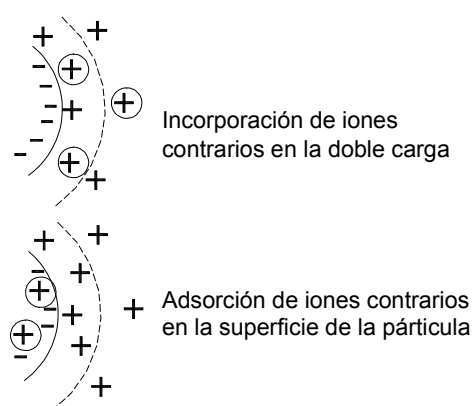
Los dos mecanismos son importantes según las etapas del proceso y según los coagulantes utilizados.

Existen muchas investigaciones al respecto. Sin embargo, la coagulación es todavía un proceso no perfectamente comprendido, y por ello, se han propuesto diversas teorías no mutuamente excluyentes, que están siendo objeto de comprobación experimental.

Entre ellas:

- 1). La que explica la coagulación sólo por la compresión (reducción) de la doble capa de iones que envuelven la partícula (neutralización de cargas).
- 2). La que admite que la coagulación sucede fundamentalmente por interacción entre las partículas coloidales y los productos de las reacciones del coagulante con el agua (efecto de barrido).

De acuerdo a la primera teoría, la incorporación de electrolitos al agua produce la reducción del potencial zeta, permitiendo la aproximación de las partículas y en consecuencia facilitando su aglutinación por contacto.



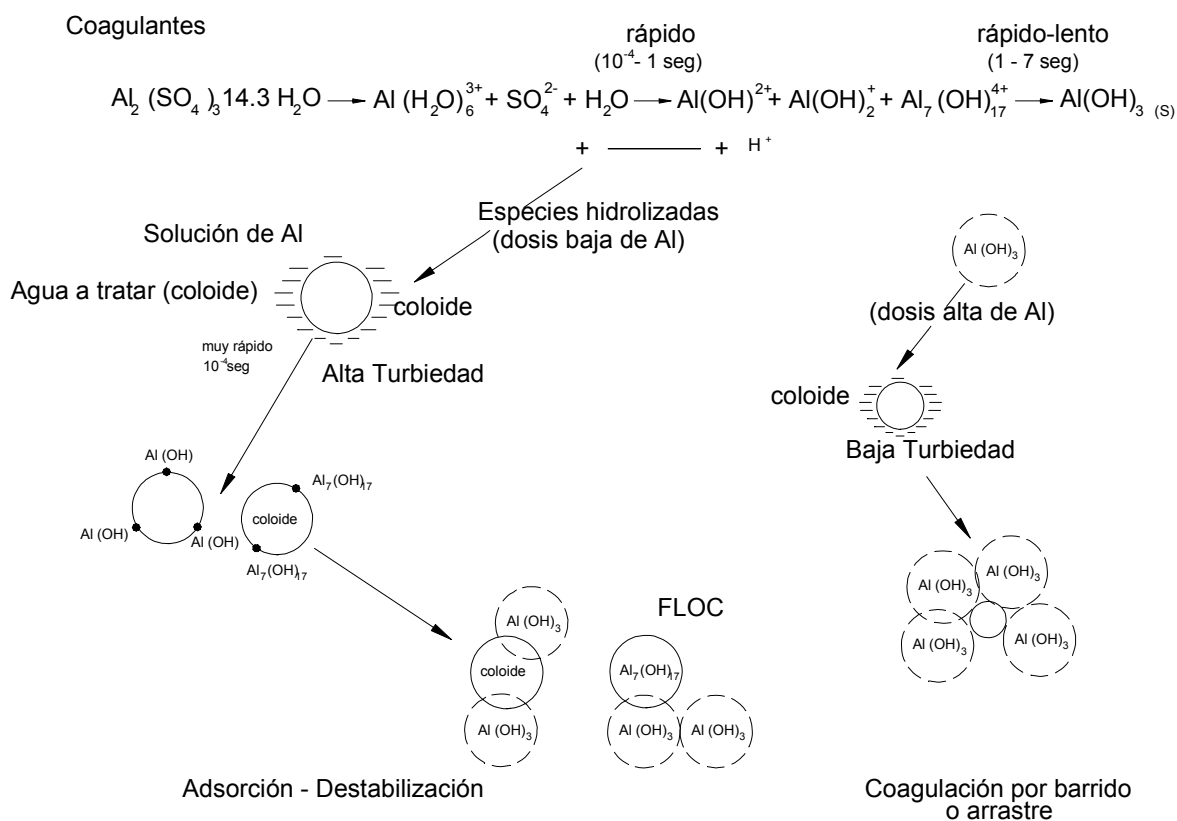
Una vez neutralizada la carga y bajado el valor de la barrera de energía la desestabilización depende como se ha indicado, de las velocidades relativas de encuentro entre partículas que permitan vencer la barrera de energía remanente.

Una vez vencida la barrera remanente esta misma barrera no permite la separación de las partículas, a menos que se produzca una acción externa.



Experiencias en la operación de plantas de tratamiento de agua y los resultados de las investigaciones de Ishibashi en 1980, dan más crédito a la teoría de la interacción de las partículas coloidales y los productos de las reacciones de los coagulantes.

En estas investigaciones se observó la formación de flóculos de sulfato de aluminio a través del microscopio electrónico. Se verificó que la adsorción de iones por el hidróxido de aluminio y el posterior entrelazamiento de las partículas con el mismo precipitado de hidróxido de aluminio, explican mejor que la teoría de la compresión de la doble capa el fenómeno de la coagulación.



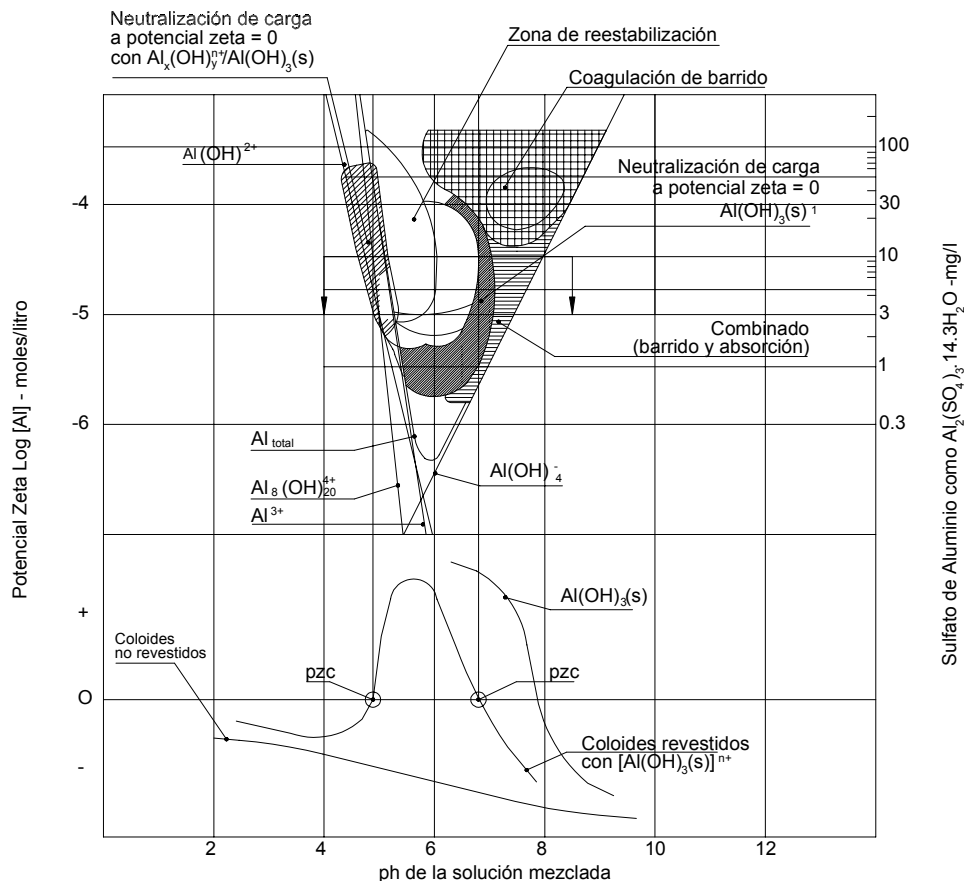
**Figura 4.** Esquema de las reacciones de coagulación con sulfato de aluminio (adaptado de Amirtharajah – The Use of Chemicals for Coagulation – 1985)

Teniendo en cuenta que, como se ha indicado las dos teorías no son mutuamente excluyentes. En la **Figura 4** se resume en forma esquemática, los mecanismos predominantes en la coagulación con sulfato de aluminio que son:

- La formación de especies hidrolizadas.
- La adsorción de las especies hidrolizadas solubles por el coloide y su desestabilización.
- La coagulación por arrastre o barrido, donde el coloide se entrelaza con el precipitado de hidróxido.

El predominio de un mecanismo u otro depende fundamentalmente de los productos resultantes de las reacciones químicas del coagulante con el agua, lo que a su vez depende de la dosis de sulfato de aluminio aplicada y del pH.

Amirtharajah y Mills (1982) desarrollaron al respecto un diagrama de coagulación para sulfato de aluminio (**Figura 5**) que muestra las regiones más adecuadas para las diversas formas de coagulación, en función de la dosis de coagulante y del pH de coagulación. Como puede observarse la coagulación por adsorción o neutralización de cargas tiene lugar a bajos valores del pH.



**Figura 5.** Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad (adaptado de Armitharajah – The Use of Chemical Coagulation – 1985)

Este diagrama es diferente para cada tipo de agua en cada caso específico y debe determinarse experimentalmente.

Generalmente las condiciones óptimas para la coagulación por arrastre se obtienen entre pH 6 y 8 con dosis de sulfato entre 20 y 60 mg/l que son las condiciones normales de operación de las Plantas de Filtración Rápida.

En estos casos la coagulación con sales de aluminio y de hierro se produce por lo tanto predominantemente por arrastre. Debido a la presencia de productos de muy baja solubilidad, el hidróxido de aluminio y el de hierro precipitan rápidamente, produciendo un precipitado de carácter gelatinoso que captura otras partículas y de esta forma realiza la coagulación por arrastre (barrido).

Cabe destacar por último que las reacciones de adsorción-desestabilización son extremadamente rápidas y suceden en fracciones de segundo y en aproximadamente 1 segundo, se completan (Hahn & Stumm, 1968). La coagulación por arrastre es más lenta y se realiza en un período de 1 a 7 segundos. La coagulación por neutralización de cargas es indicada para la filtración directa o por contacto, mientras que la coagulación por arrastre es necesaria para el proceso de sedimentación, que necesita un flóculo voluminoso.

En el caso de uso de otros coagulantes el proceso de desestabilización es similar al que se tiene para el sulfato de aluminio.

Cuando se utilizan polielectrolitos como ayudantes de coagulación, éstos logran entrelazar las partículas formando redes que aumentan el efecto de barrido y dando peso adicional a los flóculos.

Cuando los polielectrolitos se utilizan como coagulantes primarios el proceso de coagulación consiste en primera instancia, básicamente en la reducción de cargas.

## 5. CALIDAD DEL AGUA CRUDA Y COAGULACIÓN

Las características físico-químicas del agua cruda que mayor importancia tienen en el control de la coagulación son: la concentración de coloides (evaluada indirectamente por la turbiedad y por el color), el pH y la alcalinidad, principalmente cuando la coagulación se realiza con sales de aluminio o de hierro.

De acuerdo con las características del agua cruda existen cuatro situaciones:

### **1). Alta concentración de coloides, baja alcalinidad**

Esta es la condición más fácil de tratar, bastando la determinación de un único parámetro: la dosis óptima de coagulante. La coagulación óptima se da con bajos valores del pH, generalmente entre 4,5 y 6,0, dependiendo del coagulante y de las restantes características del agua. Predomina el mecanismo de desestabilización cuando se tienen coloides de origen mineral. La presencia de color exige mayores dosis de coagulante y la adición de alcalinidad para ajuste del pH, llevando al mecanismo de barrido.

### **2). Alta concentración de coloides, alta alcalinidad**

En este caso es necesaria una alta dosis de coagulante y la coagulación se dará a un pH próximo al neutro. Predomina el mecanismo de barrido.

### **3). Baja concentración de coloides, baja alcalinidad**

Es la condición más difícil de tratar. Sin la adición de un alcalinizante (cal, soda cáustica, carbonato de sodio), el pH tomará valores más bajos que el óptimo de coagulación, impidiendo o dificultando la coagulación. Esa es la situación, donde generalmente es viable la filtración directa. En este caso predomina el mecanismo de adsorción.

Para la decantación podrá ser necesaria la adición de un auxiliar de coagulación, a fin de aumentar la velocidad de floculación y dar peso a los flóculos. En el caso de utilizar polielectrolitos, éstos generalmente serán no iónicos.

### **4). Baja concentración de coloides, alta alcalinidad**

La coagulación será fácilmente realizada utilizando dosis relativamente altas de coagulante, con pH alrededor de 7. Eventualmente será conveniente la adición de un auxiliar de coagulación como en la situación anterior, para dar peso al flóculo y facilitar la decantación. El mecanismo predominante es de barrido.

Debido a los diversos factores que tienen influencia sobre la coagulación, la complejidad de las reacciones involucradas y la variabilidad de las características físico-químicas de las aguas naturales, no es viable la determinación previa directa por estequiometría de las dosis de coagulante necesarias.

Normalmente las dosis de coagulante se evalúan indirectamente con el uso del aparato de "Jar-Test" o "Prueba de Jarra", a través de ensayos de coagulación detallados en el Anexo A. El aparato simula las fases de mezcla, floculación y decantación.

En el ensayo patrón, cantidades diferentes de coagulante y de otros productos (alcalinizantes, auxiliares de coagulación) normalmente utilizados en la coagulación, se adicionan a las diversas jarras, usualmente seis, que contienen el agua a ser tratada.

Las muestras sufren una agitación intensa por un corto tiempo, cerca de 1 minuto y la prueba sigue con una agitación lenta, por más de 20 ó 30 minutos, simulando la floculación. La agitación es interrumpida y el agua floculada se deja decantar durante 15 a 30 minutos. Seguidamente se toman muestras y medidas de la turbiedad y color residual, así como de otros parámetros de interés en el proceso, como alcalinidad y pH, verificando la dosis que dio mejores resultados, la que se aplicará en la estación.

I) Alta concentración de coloides – baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitación de hidróxidos (pH mayor que 7).	La dosis de coagulante se incrementa con la concentración de partículas. Es necesario la adición de alcalinidad en algunos casos.
II) Alta concentración de coloides – alta alcalinidad	Formación de precipitado. Flóculo de barrido.	La dosis de coagulantes se incrementa con la concentración de partículas.
III) Baja concentración de coloides – alta alcalinidad	Formación de precipitado. Flóculo de barrido.	Alta dosis de coagulantes. Adición de partículas.
IIII) Baja concentración de coloides – baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitación de hidróxidos (pH mayor que 7).	Alta dosis de coagulantes. Es necesario la adición de alcalinidad, partículas, o ambos.

**Tabla 2.** Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación

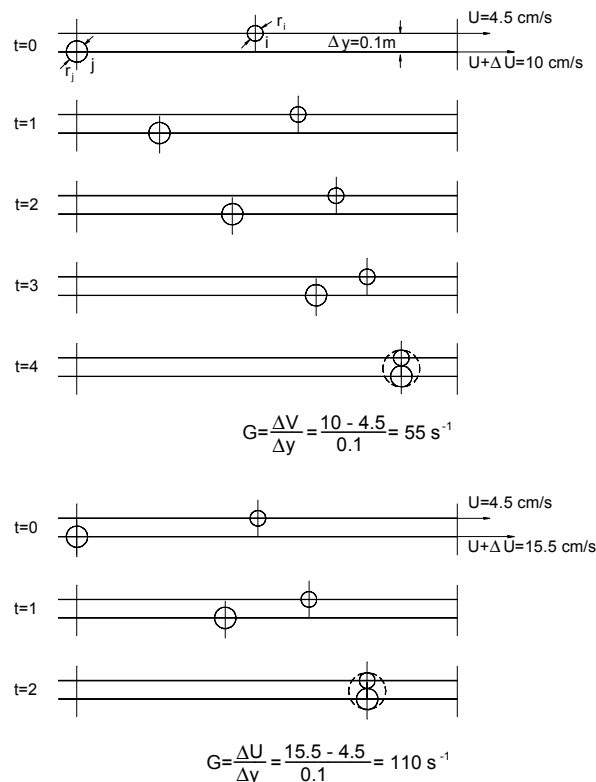
## 6. GRADIENTES DE VELOCIDAD

El agente físico para la realización tanto de la coagulación como de la floculación es la agitación más o menos intensa del agua, a través de la operación de mezcla. Se denomina mezcla rápida, cuando se aplica fundamentalmente a la primera fase de la coagulación (o coagulación propiamente dicha) y mezcla lenta, a la segunda fase o floculación propiamente dicha. A esta última fase no se aplica normalmente el término mezcla, simplemente se usa el término floculación. El grado de agitación o intensidad de la mezcla es en ambos casos, usualmente evaluado por el parámetro gradiente de velocidad.

Conceptualmente, el gradiente de velocidad en un punto de una masa líquida es el límite de la relación entre la diferencia de velocidad  $\Delta U$  con que se mueven dos capas de fluido muy próximas y distancias  $\Delta y$  entre sí:

$$\text{Gradiente de velocidad} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta y} = \frac{dU}{dy}$$

En el Anexo II “Temas Hidráulicos en el Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua” se trata este tema con mayor amplitud.



**Figura 6.** Gradiente de velocidad y colisión entre partículas

Las colisiones entre partículas se inducen por la presencia de gradientes de velocidad en el agua. Como muestra la **Figura 6**, dos conjuntos de partículas **i** y **j**, de diámetros **d<sub>i</sub>** y **d<sub>j</sub>**, moviéndose con velocidades diferentes chocan con más facilidad a gradientes más elevados. De este modo, la frecuencia de choques por unidad de volumen es proporcional al gradiente de velocidad  $\frac{du}{dy}$ , a la concentración (**n<sub>i</sub>**, **n<sub>j</sub>**) de esas partículas y al radio de colisión (**R<sub>ij</sub>**), siendo  $R_{ij} = \frac{1}{2} (d_i + d_j)$

Resulta entonces, la velocidad de reducción de las partículas (d<sub>n</sub>/d<sub>t</sub>):

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4}{3} \frac{du}{dy} n_i n_j R_{ij}^3 \quad (2)$$

Esta ecuación de Smoluchowski\* (1917), muestra que la velocidad de aglomeración de las partículas depende de:

- El gradiente de velocidad en cada punto de la masa líquida. Aumentando el gradiente de velocidad la floculación es más rápida. Sin embargo hay un límite para el cual los flóculos pueden soportar la acción de cizallamiento hidrodinámico sin que se quiebren. La solución es aplicar gradientes decrecientes a medida que los flóculos crecen. A esto se lo denomina floculación escalonada.
- La concentración de partículas. Es un hecho conocido que las aguas de muy baja turbiedad, por ejemplo, son más difíciles de flocular que las aguas de turbiedad mediana a elevada. Con frecuencia, con aguas de esas características se procede a aumentar artificialmente la concentración de partículas agregando un auxiliar de coagulación como bentonita o sílice activada.
- El cubo del radio de colisión, o sea el volumen de las partículas. Como consecuencia la floculación se acelera con la presencia de flóculos preexistentes de gran volumen, como en la floculación en manto de lodos.

A partir del concepto de gradiente de velocidad en un punto y teniendo en cuenta la importancia de la viscosidad del fluido, Camp y Stein (1943) definieron un parámetro de disipación de energía en la masa del fluido, que permite medir indirectamente un gradiente medio de velocidad en el reactor, al que llamaron gradiente de velocidad, **G**:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (3)$$

donde

**G** = gradiente de velocidad (s<sup>-1</sup>).

**P** = potencia aplicada al agua (Kgf.m.s<sup>-1</sup> ó W = N.m.s<sup>-1</sup>)<sup>®</sup>

\* Marian Smoluchowski (1872-1917), físico austríaco de origen polaco que realizó importantes descubrimientos en Física de las partículas, dando inicio a la ciencia moderna de los coloides.

<sup>®</sup> La primera unidad entre paréntesis se refiere al sistema técnico MKS, la segunda, o al sistema internacional, SI

$\mu$  = coeficiente de viscosidad dinámica

(Kgf . s . m<sup>-2</sup> en el sistema técnico ó Pa . s = N . s . m<sup>-2</sup> en el sistema independiente)

V = volumen de la cámara de mezcla (m<sup>3</sup>)

Este parámetro que carece de un significado físico definido, ha resultado muy útil para el diseño y el control de la operación de unidades de mezcla.

Es muy importante determinar el valor correcto de G a ser aplicado por sus efectos en los procesos de coagulación y floculación y la incidencia que estos procesos tienen en la eficiencia final de la planta.

El gradiente varía entre el límites muy amplios. Para la mezcla rápida debe ser elevado, entre 300 e 1000 s<sup>-1</sup> o más, y para una floculación satisfactoria generalmente entre 75 s<sup>-1</sup> al inicio y 20 s<sup>-1</sup> al final del proceso.

### **Ejemplo 2**

Calcular el gradiente de velocidad en una cámara de mezcla rápida de una estación de tratamiento de agua que trata 4,5 m<sup>3</sup>/s. El volumen de la cámara es de 9 m<sup>3</sup> y la temperatura del agua 15 °C. La cámara dispone de un mezclador mecánico que aplica al agua una potencia de 6,5 kW. Se verifica si el gradiente y el tiempo de mezcla son satisfactorios (Recordemos que  $W = N \cdot m \cdot s^{-1}$ ).

**Solución:**

1) A 15 °C  $\mu = 1,139 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Aplicando la ecuación (3) a los datos provistos,

$$G = \sqrt{\frac{6.500 \cdot N \cdot m \cdot s^{-1}}{1.139 \cdot 10^{-3} N \cdot s \cdot m^{-2} \cdot 9 m^3}} = 796 s^{-1}$$

2) El tiempo de mezcla es:

$$T = \frac{V}{Q} = \frac{9 m^3}{4,5 m^3 / s} = 2 s$$

## 7. MEZCLA RÁPIDA

### 7.1. FACTORES A CONSIDERAR EN EL PROCESO

#### *Tiempo de mezcla y gradientes de velocidad*

La mezcla rápida tiene por finalidad promover la dispersión del coagulante en el agua en forma homogénea y lo más rápido posible, por cuanto las reacciones de desestabilización de los coloides por adsorción se producen en fracciones de segundo y son irreversibles.

Por otro lado, la reacción química de formación de los hidróxidos de hierro o de aluminio solo se completa en 6 a 7 segundos. La eficiencia de la coagulación y la de los procesos subsiguientes del tratamiento, requieren diferentes condiciones de turbulencia y de tiempo de mezcla.

En la práctica, la mezcla rápida se lleva a cabo con una intensa turbulencia interna, o por turbulencia externa aplicada por dispositivos mecánicos o una combinación de las dos. La intensidad de la turbulencia es evaluada por el gradiente de velocidad y el tiempo de mezcla es actualmente definido por el tiempo necesario para que las reacciones químicas se completen, en oposición a los tradicionales 30 a 60 s, propuestos en los manuales de tratamiento de agua.

La última edición (1990) del manual de AWWA - "Water Treatment Plant Design", no suministra indicaciones precisas sobre el tiempo de mezcla y gradientes de velocidad. En la edición anterior (1969) se recomendaban tiempos de mezcla y gradientes de velocidad superiores a 20 s y  $700 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. De hecho, la experiencia demuestra que los tiempos de mezcla superiores a 5 s no mejoran significativamente la coagulación y que gradientes muy elevados son perjudiciales.

Un análisis de las dos formas de desestabilización implica que para la adsorción-desestabilización es fundamental que los coagulantes se dispersen en el caudal de agua cruda en forma instantánea (en menos de 0,1 segundo), de tal modo que los productos de hidrólisis desestabilicen los coloides. Por ese motivo, Hudson (1981) recomienda una intensa mezcla, con gradientes de velocidad del orden de  $1000 \text{ s}^{-1}$  y tiempos de mezcla iguales o inferior a 1 segundo.

Según Amirtharaj (1987) los tiempos de dispersión extremadamente cortos e intensidades de mezcla muy elevadas no son decisivos para la coagulación. Al contrario, gradientes de velocidad comprendidos entre  $1500$  a  $3500 \text{ s}^{-1}$  deben ser evitados, faja donde la comprobación teórica prevé un mínimo de desestabilización. Se pueden por lo tanto adoptar los siguientes valores:

- Tiempo de mezcla:  $< 7 \text{ s}$
- Gradientes de velocidad:  $300$  a  $1200 \text{ s}^{-1}$ .

Para gradientes superiores a  $G = 3,500 \text{ s}^{-1}$  la experiencia muestra nuevamente una desestabilización satisfactoria. Estos gradientes superiores a  $3,500 \text{ s}^{-1}$  se obtienen, normalmente, con mezcladores mecánicos en línea o en singularidades en canalizaciones con velocidades relativamente elevadas.

La solución más económica es realizar la mezcla rápida a gradientes entre 300 y 1200 s<sup>-1</sup>

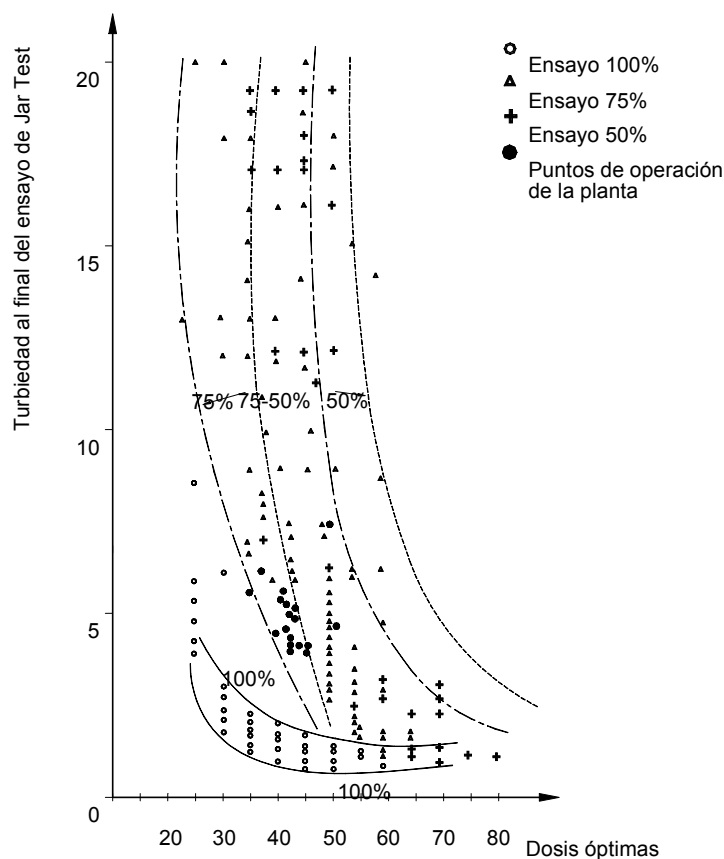
Considerando aún que una planta de tratamiento opera con diferentes caudales conforme a la demanda, Kawamura (1991) recomienda que el gradiente de velocidad **G** debe adecuarse al tiempo de mezcla resultante **T**, con **G.T** variando entre 300 a 1600.

En 1987 en la Planta Gral. San Martín en Buenos Aires se encontró mediante ensayos en Jar Test que el valor óptimo para GT era igual a 1500 para un gradiente de ensayo de 300s<sup>-1</sup>.

### Importancia de una mezcla completa

Es interesante por otra parte indicar la importancia de una buena mezcla completa del coagulante con toda la masa líquida presente en la eficiencia global del proceso.

En ocasión de los ensayos en la Planta Gral. San Martín mencionados, se realizaron, durante un período de un año, más de 200 ensayos de Jar Test para distintas condiciones de turbiedad del agua cruda, obteniéndose en cada caso las dosis óptimas de coagulante.



**Figura 7.** Ensayos de mezcla incompleta (mezcla en volúmenes parciales)

Las experiencias se repitieron para condiciones inadecuadas de mezcla. En ensayos separados se mezcló el coagulante con el 75 % y el 50 % del agua de los frascos, agregando después de efectuar la mezcla rápida, el volumen restante hasta alcanzar el nivel normal de agua en los frascos.

En la **Figura 7** se indican los resultados obtenidos. Puede verificarse que cuando el coagulante se incorporó con el frasco lleno (100 %) se requirieron dosis menores de coagulante para obtener mejor turbiedad final, que cuando se mezcló con volúmenes parciales.

En la **Figura 7** se ha indicado además varios valores de las dosis óptimas de coagulante utilizadas en la planta potabilizadora, en el mismo período, y las turbiedades resultantes del proceso en la misma planta. Se observó que la eficiencia de mezcla en la planta no era adecuada y era semejante a una mezcla imperfecta para un volumen comprendido entre el 50 y el 75 %.

### **Importancia del pH**

La coagulación con sales de aluminio o de hierro sólo se realiza satisfactoriamente a un determinado valor del pH<sup>1</sup> y en presencia de alcalinidad en una cantidad mínima para las reacciones químicas, que no debe exceder lo estrictamente necesario. Una reacción adecuada del coagulante con el agua solamente existirá si:

- Todos los productos químicos que modifican el pH (cal, soda, ácidos, cloro y otros) fuesen aplicados aguas arriba del punto de aplicación del sulfato de aluminio, a una distancia suficiente para asegurar una completa disolución y mezcla.
- El pH del agua cruda debe ser corregido antes de la introducción del coagulante y en forma tal que, luego de la reacción del sulfato de aluminio resulte el pH óptimo de coagulación.
- La dosificación de sulfato de aluminio debe efectuarse en forma constante en la cámara de mezcla rápida, de tal modo que el mismo sea inmediata y uniformemente dispersado en el agua.
- En el caso de aplicarse polímeros aniónicos o no iónicos como ayudantes de coagulación es de gran importancia el tiempo que transcurre entre la aplicación del coagulante primario y la posterior aplicación del polielectrolito. Este debe ser determinado por ensayos de coagulación. Si bien usualmente se utilizó en muchas plantas un período de 15 s, Kanamura recomienda un período de espera de 3 a 10 minutos y Stevenson halló que la floculación mejoraba progresivamente a medida que se dilataba la incorporación del polímero hasta los 30 minutos.

En esos casos el polímero se debe aplicar en una de las cámaras del floculador.

De esta forma, elegido el punto de aplicación del coagulante, todos los otros productos químicos que afectan el pH, especialmente la cal, deben ser aplicados antes que él. Jeffcoat y Singley (1975) en una serie de experiencias, confirmaron la secuencia de aplicación cal → sulfato de aluminio y observaron que si se proporciona una mezcla

<sup>1</sup> El pH óptimo para la coagulación varía generalmente en los siguientes intervalos:

- sulfato de aluminio: pH 5,5 a 7,5
- sales de hierro (III): pH 5,0 a 8,5

adecuada, la adición simultánea de la cal y del sulfato produce resultados tan buenos como cuando es aplicada la cal antes del sulfato.

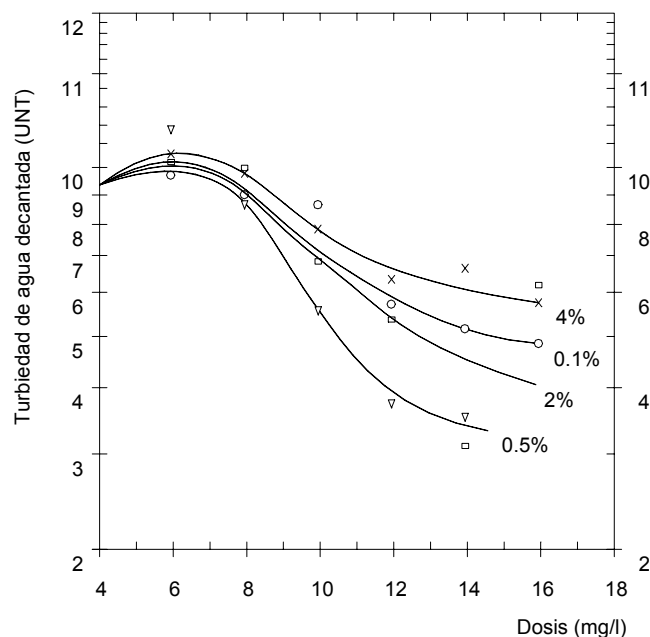
### ***Dilución del coagulante***

Aplicar de modo uniforme el sulfato de aluminio al agua es la principal dificultad para realizar una coagulación eficiente y es el objetivo principal a ser alcanzado en el proyecto de la cámara de mezcla.

El problema reside en que las cantidades de coagulantes son muy pequeñas comparadas al volumen de agua a ser tratada.

Un dosaje medio de sulfato de aluminio de 30 mg/l a una concentración de 50% representa dispersar un volumen de solución de apenas 60 cm<sup>3</sup>, equivalente a un cubo con menos de 4 cm de arista en un metro cúbico de agua.

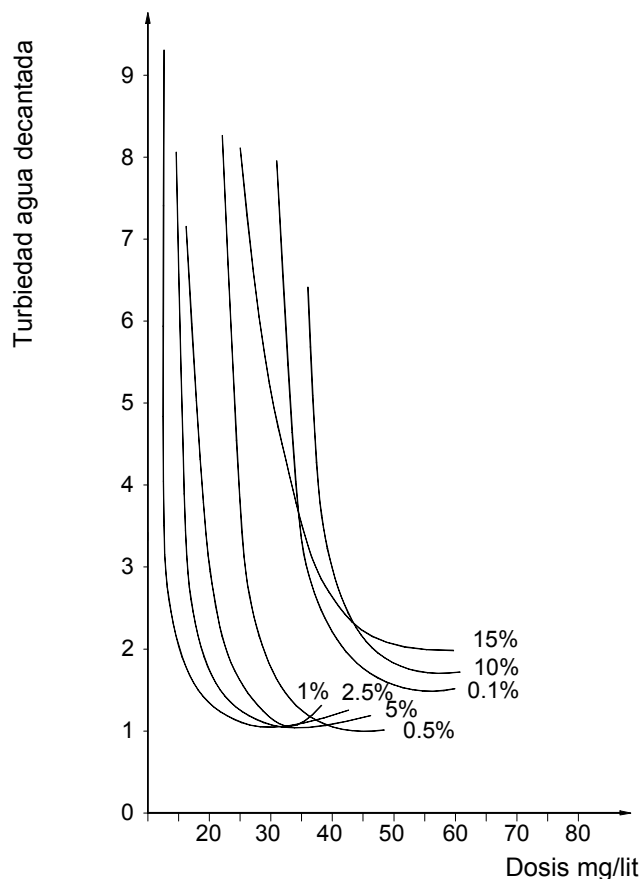
Con la condición de que haya suficiente turbulencia, la dispersión será más efectiva cuanto mayor sea el volumen de la solución de coagulante o más diluida sea ésta, resultando una mayor remoción de turbiedad consecuencia de una mejor coagulación, donde el coagulante inmediatamente entra en contacto con un mayor número de partículas coloidales.



**Figura 8.** Influencia de la dilución del coagulante (sulfato de aluminio) en la coagulación (Planta II - Foz de Iguazú)

La **Figura 8** y **Figura 9** muestran la influencia de la mayor a la menor dilución del coagulante en la coagulación y sus resultados en la decantación y filtración. Las soluciones muy diluidas de sulfato de aluminio pueden hidrolizarse antes de su aplicación, formando productos que no son tan efectivos en la desestabilización.

Jeffcoat y Singley (1975) demostraron que las mejores condiciones para la remoción de turbiedad se dan con soluciones de sulfato bastante diluidas. Sin embargo a concentraciones inferiores al 0,1% la eficiencia en la remoción de turbiedad se reduce acentuadamente. Por ello, se sugieren valores entre 0,5 a 2% como ideales para ser adoptados en la operación o en el proyecto de una planta de tratamiento de agua. Dado que con cierta frecuencia existen excepciones, se debe estudiar caso por caso.



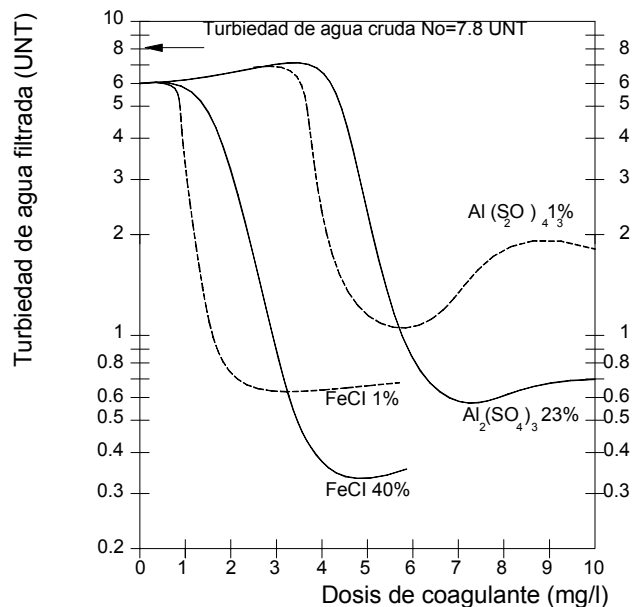
**Figura 9.** Efecto de la dilución de coagulante sobre la turbiedad del agua decantada. Determinación óptima de coagulante (Planta Gral. San Martín, Buenos Aires)

En la **Figura 10** los mejores resultados en términos de reducción de turbiedad se obtienen con mayores concentraciones de coagulante. Esto puede explicarse porque el agua cruda tiene baja concentración de coloides y baja alcalinidad, predominando en este caso el mecanismo de coagulación por adsorción.

Los productos químicos utilizados en la coagulación son aplicados en solución (coagulantes, auxiliares de coagulación, preoxidantes, etc.) o en suspensión (lechada de cal, carbón activado en polvo).

La excesiva dilución de los coagulantes metálicos con agua de alta alcalinidad se debe evitar y si es posible, se debe utilizar agua filtrada sin corrección del pH. Algunos

productos compatibles utilizan la misma cañería de dosificación, como ser cloro y sulfato de aluminio. Esto evita incrustaciones en la canalización de la dosificación.



**Figura 10.** Influencia de la clase y concentración (dilución) del coagulante (Planta de tratamiento de Vale Esperança, Vitória (ES), Brasil)

La dilución del coagulante con agua debe realizarse inmediatamente aguas arriba del punto de aplicación. En las conducciones de lechada de cal y otros productos sedimentables, se debe prever suficiente alimentación de agua para arrastre y limpieza, así como la posibilidad de una eventual desobstrucción manual de tuberías y conductos.

## 7.2. TIPOS DE MEZCLADORES

Dos tipos comunes de mezcladores, utilizados con bastante frecuencia en la práctica son los más recomendables: el resalto hidráulico y la turbina de eje vertical. Estos mezcladores caracterizan los diversos dispositivos de mezcla rápida. A estos se puede agregar la mezcla por aire, clasificando entonces los mezcladores en hidráulicos, mecánicos y neumáticos.

Satisfaciendo las condiciones ideales de mezcla discutidas anteriormente, la selección del tipo de mezclador a ser utilizado depende principalmente de los condicionamientos del proyecto, tales como capacidad, localización, etc.

Los dispositivos mecánicos y neumáticos tienen más flexibilidad en términos de gradiente de velocidad. Para los mezcladores hidráulicos las condiciones de mezcla deben verificarse cuando exista posibilidad de una variación de caudal significativa.

Esto conduce al proyecto de unidades de mezcla en paralelo, como en la Estación de Tratamiento de Agua do Guandu, que abastece a la ciudad de Río de Janeiro y realiza la

mezcla por resalto hidráulico en varias canaletas Parshall, de manera que al cambiar el caudal se aumenta o disminuye el número de canaletas en operación.

Las primeras estaciones de tratamiento de agua no disponían de dispositivos especiales para la dispersión de productos químicos. Históricamente los primeros dispositivos utilizados para esa finalidad fueron hidráulicos, habiendo J.W. Elms en 1927, patentado el resalto hidráulico que aplicó en la estación de tratamiento de Detroit. Felizmente dispositivos de mezcla tan simples y de bajo costo como son los resaltos hidráulicos han demostrado una excelente eficiencia en la mayoría de las aplicaciones.

En instalaciones de gran capacidad la utilización de un dispositivo hidráulico de mezcla puede hacerse difícil, adoptándose entonces la alternativa más simple de un mezclador mecánico.

### 7.3. MEZCLA RÁPIDA HIDRÁULICA

Cualquier dispositivo que utilice la energía hidráulica disipada en forma de pérdida de carga en el flujo del agua a través de una tubería, canal o tanque, se utiliza para la mezcla o para la floculación.

Una pérdida de carga  $h$ , producida por el desvío de un fluido de densidad  $\rho$  a un caudal  $Q$ , disipa una potencia  $P = g \cdot \rho \cdot Q \cdot h$ . Aplicando esta expresión a la ecuación (3), resulta:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{g \cdot \rho \cdot Q \cdot h}{\mu V}} = \sqrt{\frac{g \cdot \rho \cdot A \cdot U \cdot h}{\mu \cdot A \cdot L}} = \sqrt{\frac{g \cdot \rho \cdot h}{\mu \frac{L}{U}}} \quad (4)$$

luego:

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{h}{T}}$$

siendo

$$T = \frac{L}{U}$$

si

$$h = J \cdot L$$

$$U = \frac{L}{T}$$

tenemos:

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot \rho \cdot J \cdot L}{\mu T}}$$

o sea:

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot \rho}{\mu}} U \cdot J \quad (5)$$

donde:

$g$  = aceleración de la gravedad ( $\text{m.s}^{-2}$ )

$\rho$  = densidad o masa específica del agua ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )

$\mu$  = coeficiente de viscosidad dinámica ( $\text{N.s.m}^{-2} = \text{Pa.s}$ )

$T$  = tiempo de mezcla (s)

$J$  = pérdida de carga unitaria

$A$  = sección mojada ( $\text{m}^2$ )

$U$  = velocidad ( $\text{m/s}$ )

### Ejemplo 3

Sabiendo que la mezcla en un tramo recto de canalización se completa en 20 diámetros, verificar las condiciones de mezcla en la canalización de llegada del agua cruda en una estación de tratamiento que trata 50 l/s.

Datos:

- Diámetro de la canalización: 200 mm
- Coeficiente de la fórmula de Hazen-Williams:  $C = 120$
- Temperatura del agua:  $18^\circ\text{C}$
- $g = 9,807 \text{ m.s}^{-2}$
- Longitud donde se produce la mezcla  $L = 20 \cdot 0,20 \text{ m} = 4 \text{ m}$

Solución:

1) A  $18^\circ\text{C}$ :  $\rho = 998,59 \text{ Kg.m}^{-3}$

$$\mu = 1,057 \cdot 10^{-3} \text{ N.s.m}^{-2}$$

2)..La pérdida de carga unitaria por la ecuación de Hazen-Williams es

$$J = 10,62.C^{-1,85} \cdot D^{-4,87} \cdot Q^{1,85}$$

Para los datos del ejemplo,

$$J = 10,62.(120)^{-1,85} \cdot (0,20)^{-4,87} \cdot (0,05)^{1,85} = 0,015$$

3) Velocidad en la canalización

$$U = 4Q/\pi D^2 = 4 \cdot 0,05/\pi(0,20)^2 = 1,59 \text{ m/s}$$

4) Aplicando los resultados de la ecuación (5) se tiene:

$$G = \sqrt{\frac{9,807 \cdot 998,59}{0,001057}} \cdot 1,59 \cdot 0,015 = 470 \text{ s}^{-1}$$

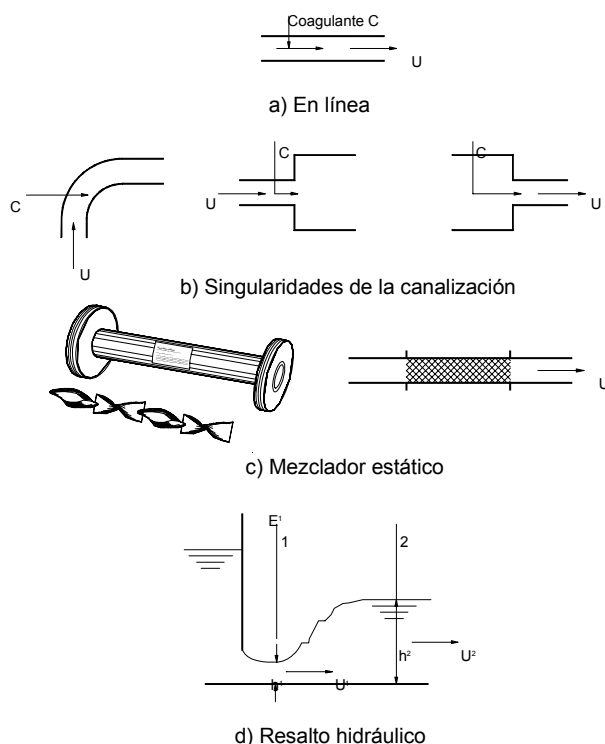
5) La mezcla se completa en una longitud  $L = 20 \cdot 0,20 = 4,0 \text{ m}$ , resultando un tiempo de mezcla

$$T = L/U = 4,0/1,59 = 2,5 \text{ s}$$

Por lo que:  $GT = 470 \cdot 2,5 = 1175$

Lo cual demuestra que la canalización de llegada presenta buenas condiciones de mezcla, tanto en permanencia como en gradiente.

A medida que aumenta el caudal a tratar, disminuye la aplicabilidad de dispositivos hidráulicos. Por ejemplo, en una estación de tratamiento con capacidad de  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y en una tubería de llegada de 1100 mm de diámetro, el gradiente resultaría cerca de  $170 \text{ s}^{-1}$  y el tiempo de mezcla de 15 s, inadecuados para la mezcla rápida.



**Figura 11.** Tipos de mezcladores hidráulicos

La mezcla hidráulica se realiza en línea, como en el **Ejemplo 3**, por singularidad en canalizaciones o por resalto hidráulico, dispositivos esquematizados en la **Figura 11**.

### **Mezcla hidráulica en línea**

Puede ser en un conducto abierto o cerrado. El cálculo del gradiente de velocidad se realiza como en el **Ejemplo 3**, por lo tanto es conveniente escoger para generalizar una fórmula de pérdida de carga que sirva tanto para conductos a pelo libre como a presión. La fórmula de Manning satisface esta condición. Sustituyendo la expresión de la pérdida de carga unitaria dada por la fórmula de Manning:

$$J = \left( n \cdot R_H^{-0,67} \right)^2 U^2$$

donde  $R_H$  = Radio Hidráulico =  $\frac{\text{área de la sección}}{\text{perímetro mojado}}$

en la ecuación (5), resulta

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot \rho \cdot J}{\mu}} \cdot U = n \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \rho}{\mu}} \cdot R_H^{-0,67} U^{1,5} \quad (6)$$

donde  $n$  es el coeficiente de la fórmula de Manning. Valores indicativos de  $n$  se muestran en la **Tabla 3**.

Superficie	$n$
Metal liso	0,009 a 0,011
Metal rugoso	0,010 a 0,015
Hormigón liso	0,010 a 0,015
Hormigón rugoso	0,015 a 0,017

**Tabla 3.** Valores del coeficiente de Manning

La ecuación (6) se aplica en el cálculo del gradiente de velocidad en conductos a presión, canales abiertos y orificios (compuertas, válvulas, etc.).

En esta última situación es, particularmente, útil la verificación del gradiente máximo soportado por el agua ya floculada, con un valor límite que no debe ser superado para evitar la rotura de flóculos.

#### **Ejemplo 4**

Para las condiciones del **Ejemplo 3**, el coeficiente de la fórmula de Manning equivalente al de Hazen-Williams adoptado ( $C = 120$ ) es  $n = 0,01$ . Calcular el gradiente de velocidad con los datos del **Ejemplo 3**, empleando la ecuación (6).

**Solución:**

1) Son datos  $g = 9,807 \text{ m.s}^{-2}$

$$\rho = 998,59 \text{ Kg.m}^{-3}$$

$$\mu = 0,001057 \text{ N.s.m}^{-2}$$

$$U = 1,59 \text{ m.s}^{-1}$$

$$n = 0,01$$

2)  $R_H = 0,20/4 = 0,05 \text{ m}$

Por ser un conducto de sección circular  $R_H = \frac{D}{4}$

Sustituyendo los valores de la ecuación (6), resulta:

$$G = 0,01 \cdot \sqrt{\frac{9,807 \cdot 998,59}{0,001057}} \cdot (0,05)^{-0,67} \cdot (1,59)^{1,5} = 454 \text{ s}^{-1},$$

Resulta una pequeña diferencia (3%) respecto al **Ejemplo 3** no significativa en la evaluación de los gradientes de velocidad.

#### **Mezcla en singularidades de los conductos**

Existen una serie de dispositivos que se incluyen en esta categoría:

- 1). Curva o cambio de dirección.
- 2). Expansión brusca.
- 3). Placa de orificio.
- 4). Válvula.
- 5). Cualquier otro que provoque una pérdida de carga localizada.

La pérdida de carga puede determinarse con la expresión:

$$h = K \cdot \frac{U^2}{2g}$$

Los valores de K se mencionan en los manuales de hidráulica. Los de mayor interés se presentan en la **Tabla 4**.

Curva 90° con bridas, normal	K = 0,2 - 0,3
Curva 90° con bridas, radio largo	K = 0,15 - 0,25
Válvula exclusiva, abierta	K = 0,12
Válvula mariposa, abierta	K = 0,25
Válvula de globo, abierta	K = 4,0
Ampliación gradual*	d/D = 0,5   0,6   0,7   0,8 K = 0,75   0,5   0,25   0,1
Estrechamiento gradual*	d/D = 0,5   0,6   0,7   0,8 K = 0,2   0,17   0,1   0,05
Alargamiento brusco*	d/D = 0,2   0,3   0,4   0,5   0,7   0,85 K = 0,9   0,8   0,7   0,6   0,25   0,1
Estrechamiento brusco *	d/D = 0,3   0,4   0,5   0,6   0,7   0,8 K = 0,7   0,6   0,5   0,43   0,35   0,2

\*La velocidad U se refiere al conducto de menor diámetro.

**Tabla 4.** Valores de K

Se sabe que alrededor del 80% de la energía hidráulica correspondiente a la pérdida de carga **h**, es disipada en una extensión de 5 diámetros aguas debajo de la singularidad, con un tiempo de mezcla **T = 5d/U**. Aplicando **T** y el 80% de **h** en la ecuación (4), resulta

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot \rho \cdot h}{\mu \cdot T}} = \sqrt{\frac{g \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{U}{5d} \cdot 0,8 \cdot \frac{k \cdot U^2}{2g}} = \sqrt{\frac{0,8}{5 \cdot 2} \cdot \frac{\rho k}{\mu} \cdot \frac{U^3}{d}}$$

o sea:

$$G = 0,283 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu} \cdot \frac{K}{d}} \cdot U^{1,5} \quad (7)$$

#### **Ejemplo 5**

En la estación de tratamiento a la que se refiere el **Ejemplo 3** existen otras dos posibilidades de realizar la mezcla en la canalización de llegada del agua cruda: (i) en una curva 90° en la canalización de 200 mm; (ii) inmediatamente antes de una válvula tipo globo. Evaluar las condiciones de mezcla para estas otras dos posibilidades.

**Solución:**

1). Son datos  $\rho = 998,59 \text{ Kg.m}^{-3}$

$$\mu = 0,001057 \text{ N.s.m}^{-2}$$

$$d = 0,20 \text{ m}$$

$$U = 1,59 \text{ m.s}^{-1}$$

$$2). \text{ Tiempo de mezcla} \quad T = 5 \cdot 0,20/1,59 = 0,63 \text{ s}$$

$$3). \text{ Curva } 90^\circ \quad K = 0,25$$

$$G = 0,283 \cdot \sqrt{\frac{998,59}{0,001057} \cdot \frac{0,25}{0,20}} \cdot (1,59)^{1,5} = 617 \text{ s}^{-1}$$

$$\text{resultando } G \cdot T = 0,63 \text{ s} \cdot 617 \text{ s}^{-1} = 389$$

$$4). \text{ Válvula de globo} \quad K = 4,0$$

$$G = 0,283 \cdot \sqrt{\frac{998,59}{0,001057} \cdot \frac{4}{0,2}} \cdot (1,59)^{1,5} = 2.466 \text{ s}^{-1}$$

Este valor de G es inadecuado por encontrarse dentro de los límites de mínima desestabilización según Amirtharajah (1982).

Además de estos dispositivos que permiten realizar la mezcla hidráulica en el conducto de llegada del agua cruda, se deben mencionar los llamados mezcladores estáticos, diseñados para producir alteraciones en el flujo más compatibles con la operación de mezcla en línea, aumentando su eficiencia.

Sus características, inclusive la pérdida de carga y el tiempo de mezcla varían de acuerdo con el fabricante. Un mezclador en medio granular (piedras) que ha sido utilizado con éxito en pequeñas instalaciones en el sur de Brasil (Paraná) se muestra en la **Figura 11**.

### **Resalto hidráulico**

Un resalto hidráulico existe cuando la corriente líquida pasa del régimen rápido al tranquilo. En este caso el tirante pasa de un valor inferior al tirante crítico hasta superarlo. Son frecuentemente utilizados para la mezcla rápida resaltos producidos en canales rectangulares por cambio de declive, en canaletas Parshall y en vertederos (provocados por la caída libre).

Para que exista resalto es necesario que las profundidades del agua inmediatamente antes y después del resalto,  $h_1$  e  $h_2$ , satisfagan la relación

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (8)$$

donde

$$F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} \quad (9)$$

es el número de Froude correspondiente a la sección (1) de la **Figura 11**.

En hidráulica se conocen diversos tipos de resalto conforme al valor del número de Froude.

- $F_1 = 1,0$  a  $1,7$ . Resalto ondulado: la superficie del agua presenta suaves ondulaciones.
- $F_1 = 1,7$  a  $2,5$ . Resalto débil: turbulencia superficial, baja pérdida de carga.
- $F_1 = 2,5$  a  $4,5$ . Resalto oscilante: el flujo aguas arriba penetra en el frente turbulento del resalto con un chorro oscilante que genera ondas superficiales irregulares.
- $F_1 = 4,5$  a  $9,0$ . Resalto estable: el resalto es fuerte y de forma estable, libre de ondulaciones irregulares.
- $F_1 > 9,0$ . Resalto fuerte: gran turbulencia y gradualmente encrespado a medida que aumenta  $F_1$ .

El tipo de resalto deseable para la mezcla rápida es el estable, con número de Froude comprendido entre  $4,5$  a  $9,0$ . Puede aceptarse también el salto débil debiendo evitarse el resalto ondulado y oscilante.

La energía hidráulica disipada en forma de pérdida de carga se computa por la fórmula de Bélanger:

$$h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} \quad (10)$$

Esa pérdida de carga es disipada en el volumen de agua comprendido entre las secciones (1) y (2) (**Figura 8d**), correspondiendo a la extensión  $L$  del resalto. Para números de Froude entre  $1,7$  a  $2,5$  (resalto débil) la extensión del resalto se estima por la fórmula de Safranez:

$$L = 4,5 h_2 \quad (11)$$

Con números de Froude iguales o mayores a  $4,5$ , se utiliza la fórmula de Smetana:

$$L = 6 (h_2 - h_1) \quad (12)$$

o, aproximadamente

$$L = 6,1 h_2 \quad (12a)$$

El gradiente de velocidad, entonces, puede ser calculado con la pérdida de carga dada en la ecuación (9) y con un tiempo de mezcla.

$$T = \frac{L}{(U_1 + U_2)/2} \quad (13)$$

donde  $U_1$  = velocidad del agua en la sección 1, m.s<sup>-1</sup>

$U_2$  = velocidad del agua en la sección 2, m.s<sup>-1</sup>.

### Resalto por cambio de declive

Un cambio de declive en un canal rectangular es una manera simple de generar un resalto para la mezcla rápida. El gradiente de velocidad es calculado a través de la determinación de las alturas conjugadas,  $h_1$  e  $h_2$ , admitiendo que la carga hidráulica disponible en la sección (1) (Figura 12) es:

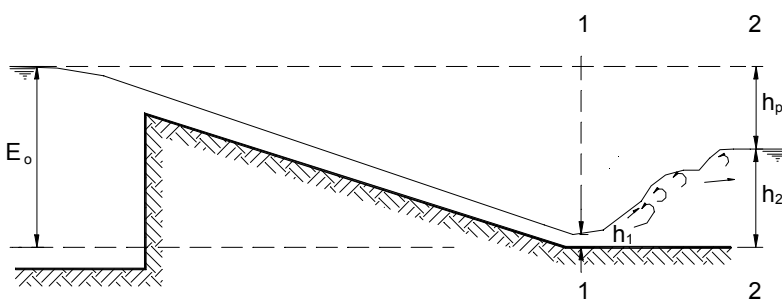


Figura 12. Resalto en canal por cambio de pendiente

$$E_1 = E = \frac{U_1^2}{2g} + h_1 \quad (14)$$

desestimadas las pérdidas de carga.

La altura del agua antes del resalto es:

$$h_1 = \frac{Q}{B \cdot U_1} = \frac{q}{U_1} \quad (15)$$

donde **B** es el ancho del canal y **q** es el caudal específico en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>/m. Substituyendo (15) en (14) se tiene:

$$\frac{U_1^2}{2g} + \frac{q}{U_1} - E_0 = 0 \quad (16)$$

ecuación de tercer grado en  $U_1$ , cuya solución es dada por:

$$U_1 = 2\sqrt{\frac{2}{3}g E_0} \cos \frac{\theta}{3}$$

donde

$$\theta = \arccos \left[ - \frac{g \cdot q}{\left( \frac{2}{3} \cdot g \cdot E_0 \right)^{3/2}} \right] \quad (17)$$

A partir de  $U_1$  los demás parámetros son fácilmente determinados en la siguiente secuencia:

$h_1$  por la ecuación (15),

$F_1$  por la ecuación (9),

$h_2$  por la ecuación (8),

$h$  por la ecuación (10),

$L$  por la ecuación (11), (12) o (12a) conforme el valor de  $F_1$ .

Con  $U_1$  e  $U_2 = q/h_2$  se determina  $T$  por la ecuación (13).

Finalmente con  $h$  y  $T$  se calcula el gradiente de velocidad con la ecuación (4):

$$G = \sqrt{\frac{g \rho}{\mu} \cdot \frac{h}{T}}$$

### Ejemplo 6

Verificar las condiciones de mezcla rápida en el canal esquematizado en la **Figura 11**, para  $E_0 = 0,60$  m y un caudal de 120 l/s. El ancho del canal es  $B = 0,80$  m y la temperatura del agua 15 °C.

*Solución:*

1) A 15 °C  $\rho = 999,13 \text{ Kg.m}^{-3}$

$$\mu = 0,001139 \text{ N.s.m}^{-2}$$

2) Caudal específico  $q = \frac{Q}{B} = \frac{0,120}{0,80} = 0,15 \text{ m}^3\text{s}^{-1} / \text{m}$

3) Cálculo de  $U_1$  e  $h_1$

$$\cos \theta = - \frac{g \cdot q}{\left( \frac{2}{3} g E_0 \right)^{1,5}} = - \frac{9,8 \cdot 0,15}{\left( \frac{2}{3} \cdot 9,8 \cdot 0,60 \right)^{1,5}} = -0,189 \quad \therefore \cos \frac{\theta}{3} = 0,834$$

$$4) \quad U_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} g E_o} \cdot \cos \frac{\theta}{3} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot 9,8 \cdot 0,60} \cdot 0,834 = 3,30 \text{ m.s}^{-1}$$

$$h_1 = \frac{q}{U_1} = \frac{0,15}{3,30} = 0,05 \text{ m} \quad (\text{aplicando la ecuación 15})$$

$$5) \quad \text{Cálculo de } F_1 \quad F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}} = \frac{3,30}{\sqrt{9,8 \cdot 0,05}} = 4,7 \quad (\text{aplicando la ecuación 9})$$

indicando un resalto estable, adecuado a la mezcla rápida.

6) Cálculo de  $h_2$  e  $U_2$

aplicando la ecuación 8:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \right) = \frac{0,05}{2} \left( \sqrt{1 + 8(4,7)^2} - 1 \right) = 0,30 \text{ m}$$

$$U_2 = \frac{q}{h_2} = \frac{0,15}{0,30} = 0,50 \text{ m.s}^{-1}$$

7) Cálculo de la pérdida de carga y del tiempo de mezcla

$$\text{aplicando la ecuación 10:} \quad h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 h_1 h_2} = \frac{(0,3 - 0,05)^3}{4 \cdot 0,3 \cdot 0,05} = 0,26 \text{ m}$$

$$\text{aplicando la ecuación 12a:} \quad L = 6,1 h_2 = 6,1 \cdot 0,30 = 1,83 \text{ m}$$

$$\text{aplicando la ecuación 13} \quad T = \frac{L}{(U_1 + U_2)/2} = \frac{1,83}{(3,30 + 0,5)/2} = 0,96 \text{ s}$$

8) Cálculo del gradiente de velocidad

$$\text{aplicando la ecuación 4:} \quad G = \sqrt{\frac{g \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{h}{T}} = \sqrt{\frac{9,8 \cdot 999,13}{0,001139} \cdot \frac{0,26}{0,96}} = 1526 \text{ s}^{-1}$$

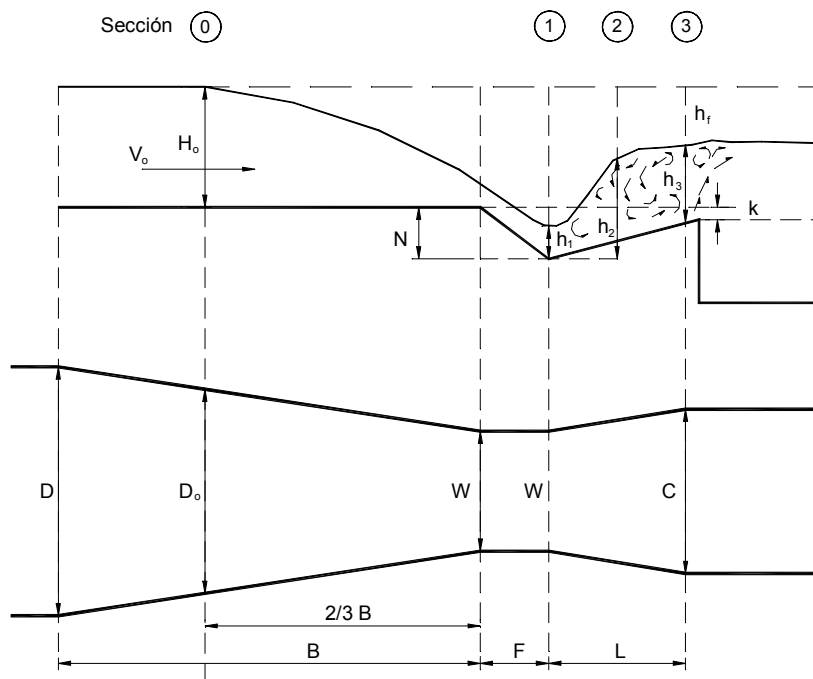
$G \cdot T = 1526 \cdot 0,96 = 1465$  que indica buenas condiciones de mezcla, por ser inferior a 1500.

### Resalto en canaletas Parshall

La canaleta Parshall, utilizada inicialmente como medidor caudal es un dispositivo eficiente de mezcla rápida. Como se ve en la **Figura 13**, la canaleta Parshall consiste de tres secciones:

1). Una sección convergente aguas arriba que conduce a

- 2). una sección estrangulada o garganta y
- 3). una sección divergente en la salida dispuestas en planta. El piso en la sección convergente es horizontal, se inclina hacia abajo en la garganta y hacia arriba en la sección de salida.



**Figura 13.** El resalto hidráulico en la canaleta Parshall

Las dimensiones normalizadas de la canaleta Parshall, mostradas en la **Tabla 5**, constituyen una ventaja porque permiten el conocimiento previo de los gradientes de velocidad con el empleo de tablas o de gráficos, evitando cálculos exhaustivos como en el ejemplo anterior.

W		A	B	C	D	E	F	L	K	N
mm.										
9"	229	880	864	380	575	763	305	457	76	114
1'	305	1372	1344	610	845	915	610	915	76	229
1 ½'	457	1449	1420	762	1026	915	610	915	76	229
2'	610	1525	1496	915	1207	915	610	915	76	229
3'	915	1677	1645	1220	1572	915	610	915	76	229
4'	1220	1830	1795	1525	1938	915	610	915	76	229
5'	1525	1983	1941	1830	2303	915	610	915	76	229
6'	1830	2135	2090	2135	2667	915	610	915	76	229
7'	2135	2288	2240	2440	3030	915	610	915	76	229
8'	2440	2440	2392	2745	3400	915	610	915	76	229

**Tabla 5.** Dimensiones normalizadas de Canaletas Parshall (mm)

La secuencia de cálculo es semejante a la de los canales rectangulares, introduciéndose las alteraciones debidas a las variaciones de sección. La energía hidráulica disponible se calcula en la sección de medición (Sección 0 **Figura 13**):

$$E_o = \frac{U_o^2}{2g} + H_o + N \quad (18)$$

La profundidad del agua en la sección de medición se calcula por la ecuación

$$H_o = k \cdot Q^n \quad (19)$$

con los valores de k y n dados en la **Tabla 6**.

W		k	n
Pulgadas	mm		
9"	229	1,486	0,633
1'	305	1,276	0,657
1 1/2'	460	0,966	0,650
2'	610	0,795	0,640
3'	915	0,608	0,639
4'	1220	0,505	0,634
5'	1525	0,436	0,630
6'	1830	0,389	0,627
8'	2440	0,324	0,623

**Tabla 6.** Valores de k y n para la ecuación 19

La velocidad en la sección de medición es:

$$U_o = \frac{Q}{H_o \cdot D_o} \quad (20)$$

con

$$D_o = \frac{2}{3}(D - W) + W \quad (21)$$

donde W, D e N son dimensiones de la canaleta Parshall, dadas en la **Tabla 5**.

Como prácticamente toda la energía es disipada en la sección divergente, el tiempo de mezcla se estima por la velocidad media entre la velocidad U, en la salida de la garganta (sección 1) y la velocidad en la salida de la Parshall (sección 3, **Figura 13**).

### Ejemplo 7

Verificar las condiciones de mezcla de una canaleta Parshall de 8' (2,44 m) de garganta, para el caudal de 1.200 l/s. Temperatura del agua: 17,5 °C.

**Solución:**

1). Datos: A 17,5 °C,  $\rho = 998,68 \text{ Kg.m}^{-3}$

$$\mu = 0,001071 \text{ N.s.m}^{-2}$$

De la **Tabla 5:**  $C = 2,745 \text{ m}$

$$D = 3,400 \text{ m}$$

$$K = 0,076 \text{ m}$$

$$N = 0,229 \text{ m}$$

De la **Tabla 6:**  $k = 0,324$

$$n = 0,623$$

2). Cálculo de la profundidad y velocidad del agua en la sección de medición (sección 0)

$$H_o = kQ^n = 0,324(1,2)^{0,623} = 0,363 \text{ m}$$

$$D_o = \frac{2}{3}(D - W) + W = \frac{2}{3}(3,40 - 2,44) + 2,44 = 3,08$$

$$U_o = \frac{Q}{D_o H_o} = \frac{1,2}{3,08 \cdot 0,363} = 1,073 \text{ m.s}^{-1}$$

3). Caudal específico en la garganta de la Parshall

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{1,2}{2,44} = 0,492 \text{ m}^3 \text{s}^{-1} / \text{m}$$

4). Carga hidráulica disponible

$$E_o = \frac{U_o^2}{2g} + H_o + N = \frac{(1,073)^2}{2 \cdot 9,807} + 0,363 + 0,229 = 0,651 \text{ m}$$

- 5). Cálculo de la velocidad y de la profundidad del agua inmediatamente antes del resalto (sección 1)

$$\cos \theta = -\frac{gq}{\left(\frac{2}{3}gE_o\right)^{1,5}} = -\frac{9,807 \cdot 0,492}{\left(\frac{2}{3} \cdot 9,807 \cdot 0,651\right)^{1,5}} = -0,549$$

$$U_1 = 2\sqrt{\frac{2gE_o}{3}} \cos \frac{\theta}{3} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,807 \cdot 0,651}{3}} \cdot 0,754 = 3,111 \text{ m.s}^{-1}$$

$$h_1 = \frac{q}{U_1} = \frac{0,492}{3,111} = 0,158 \text{ m}$$

6). Número de Froude  $F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}} = \frac{3,111}{\sqrt{9,807 \cdot 0,158}} = 2,5$

- 7). Cálculo de la altura conjugada del resalto (sección 2)

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) = \frac{0,158}{2} \left( \sqrt{1 + 8(2,5)^2} - 1 \right) = 0,485 \text{ m}$$

- 8). Profundidad y velocidad del agua en la sección de salida (sección 3)

$$h_3 = h_2 - (N - K) = 0,485 - (0,229 - 0,076) = 0,332 \text{ m}$$

$$U_3 = \frac{Q}{C \cdot h_3} = \frac{1,2}{2,745 \cdot 0,332} = 1,317 \text{ m.s}^{-1}$$

- 9). Extensión del resalto y pérdida de carga

$$L = 6(h_2 - h_1) = 6(0,485 - 0,158) = 1,962 \text{ m}$$

$$h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} = \frac{(0,485 - 0,158)^3}{4 \cdot 0,485 \cdot 0,158} = 0,113 \text{ m}$$

- 10). Tiempo de mezcla y gradiente de velocidad

$$T = \frac{L}{(U_1 + U_3)/2} = \frac{1,962}{(3,108 + 1,318)/2} = 0,89 \text{ s}$$

$$G = \sqrt{\frac{9,807 \cdot 998,68}{0,001071} \cdot \frac{0,113}{0,89}} = 1078 s^{-1}$$

Resultado  $G \cdot T = 959$  o sea buenas condiciones con un resalto aun estable  $F = 2,5$ .

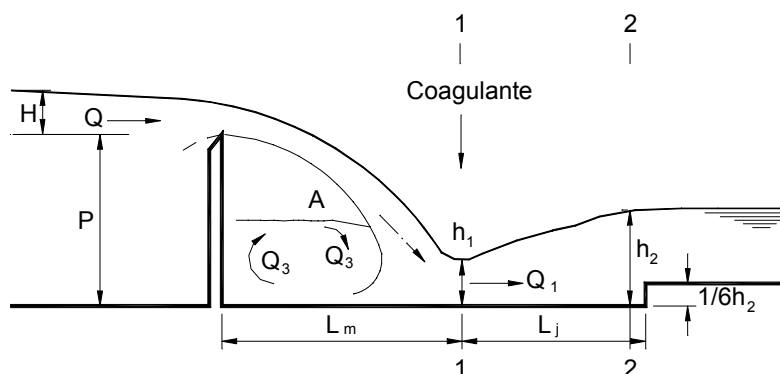
Canaletas Parshall con menos de 9" (22,9 cm) de garganta producen gradientes muy bajos. Las canaletas Parshall pueden utilizarse en un intervalo desde algunas decenas hasta cerca de 1500 - 2000 litros por segundo. Para caudales mayores encuentran mejor aplicación los mezcladores mecánicos. Para pequeños caudales, hasta cerca de 100 l/s, se utiliza el resalto provocado por la caída libre del agua a través de los vertederos.

En el Anexo 1 de este Capítulo se presenta el Cuadro "Condiciones de Mezcla en Canaletas Parshall", donde se indican Número de Froude, tiempo de mezcla y gradientes de velocidad en función del caudal para diversos tamaños de canaletas.

### **Resalto en Vertederos Rectangulares**

Los vertederos son dispositivos simples y eficientes para la mezcla rápida cuando están adecuadamente dimensionados. Son fáciles de construir y se utilizan también para medición de caudal. Mientras tanto, como la pérdida de carga en un vertedero es significativa, generalmente superior a 30 cm, los vertederos para mezcla rápida no son usados en pequeñas instalaciones siendo aplicados cuando se dispone de suficiente carga topográfica positiva.

En la **Figura 14** está representada la forma más simple de un vertedero rectangular, en donde la longitud de su umbral es igual al ancho del canal correspondiente, o sea sin la influencia de la contracción lateral. La lámina vertiente alcanza el piso en la sección 1. En ese lugar hay una gran pérdida de energía debida a la circulación de la masa de agua indicada como  $Q_3$ , represada bajo la lámina del chorro de agua. Esa masa produce el empuje necesario para cambiar el chorro hacia una dirección horizontal.



**Figura 14.** Resalto en un vertedero rectangular

Luego de la caída, parte de la energía remanente es disipada en el resalto que se forma aguas abajo, la cual se utiliza en la mezcla rápida. El punto de aplicación del coagulante deberá estar sobre la sección 1, a una distancia  $L_m$  del vertedero, asegurando de este modo, una dispersión homogénea y continua del coagulante en todo el agua.

Cuando la lámina de agua alcanza el fondo, se divide en una corriente principal que se mueve hacia el frente y otra secundaria que retorna contribuyendo a la masa de agua represada aguas arriba. Un volumen igual de agua es arrastrado por el chorro en el punto A, retornando a la misma masa  $Q_3$ . La distancia  $L_m$  se calcula por la fórmula de Rand (1955).

$$L_m = 1,31 P \left( \frac{h_c}{P} \right)^{0,9} \quad (22)$$

La energía remanente de la caída libre genera el resalto hidráulico. La profundidad de la lámina de agua inmediatamente antes del resalto  $h_1$ , está relacionada con la profundidad crítica  $h_c$ , por la relación debida a Moore (1943).

$$h_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot h_c}{1,06 + \sqrt{\frac{P}{h_c} + \frac{3}{2}}} \quad (23)$$

con 
$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (24)$$

siendo  $q = Q/L$  el caudal específico y  $L$  el ancho del vertedero.

A partir de allí, los cálculos siguen la misma secuencia de los cálculos de un canal rectangular. La pérdida de carga total, diferencia entre el nivel del agua aguas arriba y aguas abajo del vertedero, es:

$$h_T = P + H - h_2 \quad (25)$$

donde  $H$  es la carga sobre el vertedero y por la fórmula de Francis, equivale a  $H = 0,67 q^{2/3}$

Recordemos que:  $Q = z \cdot L H^{3/2}$

entonces: 
$$H = \left( \frac{Q}{z \cdot L} \right)^{2/3} = \left( \frac{1}{z} \right)^{2/3} \cdot q^{2/3} = 0,67 \cdot q^{2/3}$$

para un vertedero rectangular sin contracciones laterales es  $z = 1.823$

### Ejemplo 8

En un vertedero rectangular, instalado en un canal rectangular de ancho  $L = 50$  cm, con la finalidad de medir el caudal y efectuar la mezcla rápida, pasa un caudal de 40 l/s con una altura de caída  $P = 0,40$  m. Verificar las condiciones de mezcla, siendo la temperatura del agua  $10^\circ\text{C}$  y calcular la pérdida de carga total.

**Solución:**

1). Datos  $Q = 0,040 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

$$L = 0,50 \text{ m}$$

$$P = 0,40 \text{ m}$$

$$g = 9,807 \text{ m.s}^{-2}$$

$$\rho = 999,73 \text{ Kg.m}^{-3}$$

$$\mu = 0,001307 \text{ N.s.m}^{-2}$$

2). Cálculo de la altura crítica:

$$q = \frac{Q}{L} = \frac{0,04}{0,5} = 0,08 \text{ m}^3\text{s}^{-1} / \text{m}$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{0,08^2}{9,807}} = 0,087 \text{ m}$$

3). Alturas conjugadas del resalto,  $h_1$  e  $h_2$ , e velocidades correspondientes:

$$h_1 = \frac{\sqrt{2} h_c}{1,06 + \sqrt{\frac{P}{h_c} + 1,5}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,087}{1,06 + \sqrt{\frac{0,40}{0,087} + 1,5}} = 0,035 \text{ m}$$

Velocidad en la sección 1:  $U_1 = \frac{q}{h_1} = \frac{0,08}{0,035} = 2,304 \text{ m}$

Número de Froude:  $F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}} = \frac{2,304}{\sqrt{9,807 \cdot 0,035}} = 3,947$

resultando por lo tanto, un resalto estable, ideal para la mezcla.

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1) = \frac{0,035}{2} (\sqrt{1 + 8 (3,947)^2} - 1) = 0,177 \text{ m}$$

$$\text{Velocidad en la sección 2: } U_2 = \frac{q}{h_2} = \frac{0,08}{0,177} = 0,451 \text{ m.s}^{-1}$$

4). Pérdida de carga en el resalto

$$h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 h_1 h_2} = \frac{(0,177 - 0,035)^3}{4 \cdot 0,035 \cdot 0,177} = 0,118$$

5). Tiempo de mezcla

$$\text{Extensión del resalto } L = 6(h_2 - h_1) = 6(0,177 - 0,035) = 0,855 \text{ m}$$

$$\text{Velocidad media en el resalto } U = \frac{U_1 + U_2}{2} = \frac{2,304 + 0,451}{2} = 1,377 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Tiempo de mezcla } T = \frac{L}{U} = \frac{0,855}{1,377} = 0,62 \text{ s}$$

6). Gradiente de velocidad

$$G = \sqrt{\frac{g\rho}{\mu} \cdot \frac{h}{T}} = \sqrt{\frac{9,807 \cdot 999,73}{0,001307} \cdot \frac{0,118}{0,62}} = 1 \cdot 194 \text{ s}^{-1}$$

7). Punto de aplicación del coagulante

$$L_m = 1,31 P \left( \frac{h_c}{P} \right)^{0,9} = 1,31 \cdot 0,40 \left( \frac{0,087}{0,40} \right)^{0,9} = 0,13 \text{ m}$$

8). Pérdida de carga total

Carga H sobre el vertedero:

$$H = 0,67 q^{2/3} = 0,67 \cdot (0,08)^{2/3} = 0,124 \text{ m}$$

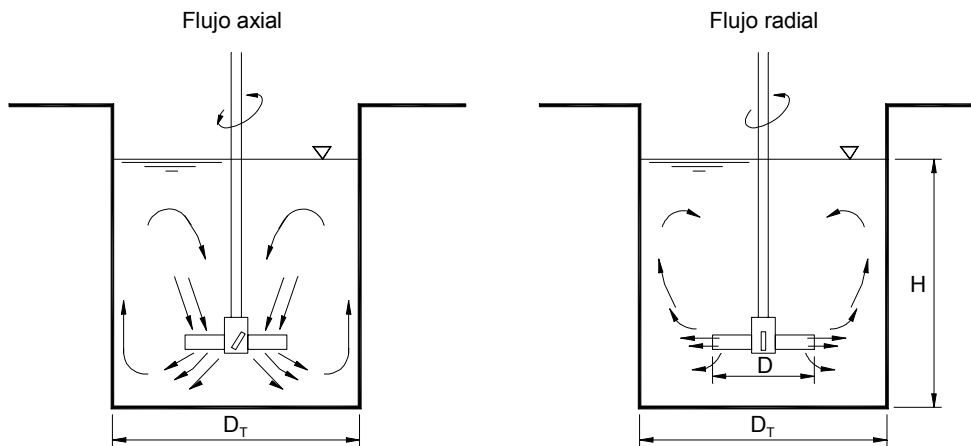
$$h_T = P + H - h_2 = 0,40 + 0,124 - 0,177 = 0,347 \text{ m}$$

## 7.4. MEZCLA MECÁNICA

Los mezcladores mecánicos se encuentran bien caracterizados en la literatura de ingeniería química y algunas configuraciones son apropiadas para su aplicación en tratamiento de agua, en particular los agitadores tipo turbina, aparatos mecánicos que producen turbulencia en un líquido a través del movimiento de rotación del impulsor.

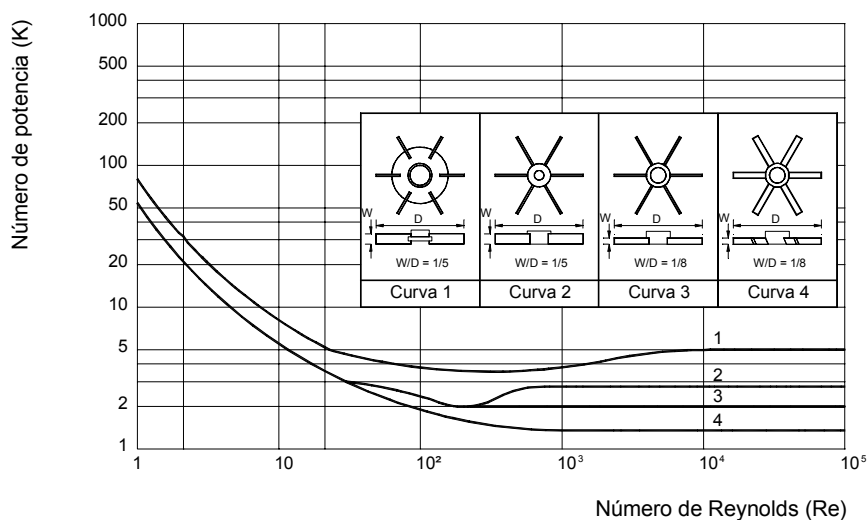
Los agitadores de turbina se clasifican por el tipo de flujo producido:

- 1). De flujo axial, que mueve el líquido paralelamente al eje del agitador.
- 2). De flujo radial, cuando el líquido se mueve perpendicularmente al eje. La **Figura 15** muestra los tipos más comunes.



**Figura 15.** Tipos básicos de turbinas

Los datos sobre la disipación de potencia para algunos tipos comunes se presentan en la **Figura 16**. La potencia disipada es función de la geometría del tanque de mezcla, del impulsor y de las características del fluido.



**Figura 16.** Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para algunos tipos de turbinas

Uhl y Gray (1966) encontraron por semejanza hidráulica, que la potencia disipada en régimen turbulento es:

$$P = K \rho n^3 D^5, \quad (26)$$

donde  $P$  = potencia disipada (W)

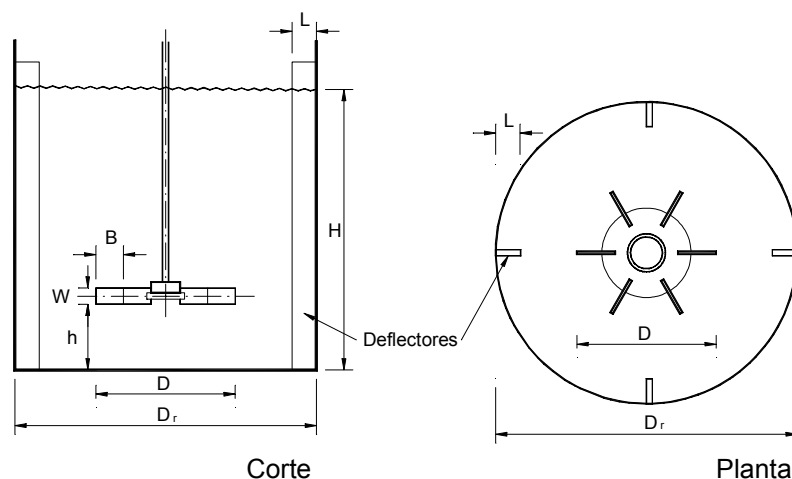
$K$  = número de potencia (adimensional)

$\rho$  = densidad del agua ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )

$n$  = número de rotaciones por segundo (r.p.s)

$D$  = diámetro de la turbina (m)

La turbina de tipo 1, de flujo radial con seis láminas cortas en un disco, es la que presenta el mayor número de potencia ( $K = 5$ ) y de este modo la mayor potencia disipada. Por este motivo es la más indicada para la mezcla rápida que comprende gradientes de velocidad elevados. Por otro lado, la turbina de flujo axial, tipo 4, con láminas conectadas al eje e inclinadas a  $45^\circ$ , es la más indicada para la fase de floculación, con una distribución uniforme de gradientes de velocidad sobre todo en el tanque, pudiendo operar así, prácticamente sin límite de velocidad que restringe el uso de otros dispositivos mecánicos de floculación.



**Figura 17.** Relaciones geométricas entre la cámara y la turbina tipo 1

### Mezcla rápida con turbinas

La mezcla con turbinas comprende inicialmente la definición de la geometría del tanque y de la turbina. Fijado el volumen del tanque en función del tiempo de mezcla, se debe tratar que las dimensiones del tanque y la turbina, cumplan las relaciones indicadas en la **Figura 17** y a la **Tabla 7**, debiendo observarse las siguientes relaciones geométricas:

$$2,7 \leq \frac{D_T}{D} \leq 3,3$$

$$2,7 \leq \frac{H}{D} \leq 3,9$$

(27)

$$0,75 \leq \frac{h}{D} \leq 1,3$$

$$B = \frac{D}{4} \quad W = \frac{D}{5} \quad l = \frac{D_T}{10}$$

Volumen del tanque (m <sup>3</sup> )	Turbina (mm)			Potencia del motor (HP)
	D	B	W	
1 a 2	370	92,5	74	1/2 a 2
1,5 a 3,5	430	107,5	86	1 a 4
2,5 a 5,5	500	120	100	1,5 a 7,5
4 a 9	600	150	120	2 a 15
6,5 a 15	700	175	140	3 a 20

**Tabla 7.** Turbinas de flujo radial con 6 paletas

En condiciones turbulentas, la potencia disipada por unidad de volumen en un tanque circular es la misma que en un tanque cuadrado, cuando el lado de éste es igual al diámetro del tanque circular, disponiendo de deflectores longitudinales en las paredes, como se ve en la **Figura 17**.

Fijados el volumen del tanque y el gradiente de velocidad, se calcula la potencia a ser disipada  $P = \mu.V.G^2$ . Con ese valor y escogidos el tipo (número de potencia) y el diámetro de la turbina, se determina la velocidad de rotación.

$$n = \sqrt[3]{\frac{P}{K \rho D^5}} \quad (28)$$

### Ejemplo 9

Dimensionar la cámara de mezcla rápida para una estación de tratamiento que tratará 1.200 l/s. La mezcla debe satisfacer las condiciones  $300 \leq GT \leq 1500$  y un tiempo de mezcla  $T = 2,5$  s. Temperatura del agua 15 °C.

**Solución:**

1). Datos  $Q = 1,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

$$T = 2,5 \text{ s}$$

$$\rho = 999,13 \text{ Kg.m}^{-3}$$

$$\mu = 0,001139 \text{ N.s.m}^{-2}$$

$$K = 5 \text{ (turbina de flujo radial con seis paletas fijadas en un disco)}$$

$$2). \text{ Dimensiones del tanque y turbina } V = T.Q = 2,5 \text{ s} \cdot 1,2 \text{ ms}^{-1} = 3,0 \text{ m}^3$$

El tanque tendrá forma cuadrada en planta. Es conveniente fijar la altura del tanque cerca de 1,2 veces su base, resultando:

$$B = D_T = 1,35 \text{ m e } H = 1,65 \text{ m}$$

De la **Tabla 7**, se elige una turbina con  $D = 0,43 \text{ m}$ . Entonces:

$$D_T / D = 1,35 / 0,43 = 3,1$$

$$H / D = 1,65 / 0,43 = 3,8$$

Siendo por lo tanto coherentes las dimensiones del tanque con la turbina seleccionada, conforme las relaciones geométricas dadas en la ecuación (27).

3). Potencia disipada y velocidades de rotación:

$$a) \text{ Para } GT = 1500, G = T/2,5 = 600 \text{ s}^{-1}$$

$$P = \mu \cdot V \cdot G^2 = 0,001139 \cdot 3,0 \cdot (600)^2 = 1230 \text{ W} = 1,65 \text{ HP}$$

La velocidad de rotación para generar el gradiente  $G = 600 \text{ s}^{-1}$ , con  $D = 0,43 \text{ m}$  es:

$$n = \sqrt[3]{\frac{P}{K \rho D^5}} = \sqrt[3]{\frac{1231}{5 \cdot 999,13 (0,43)^5}} = 2,56 \text{ r.p.s} = 153,5 \text{ r.p.m}$$

$$b) \text{ Para } GT = 500, G = 200 \text{ s}^{-1} \text{ y aplicando la ecuación}$$

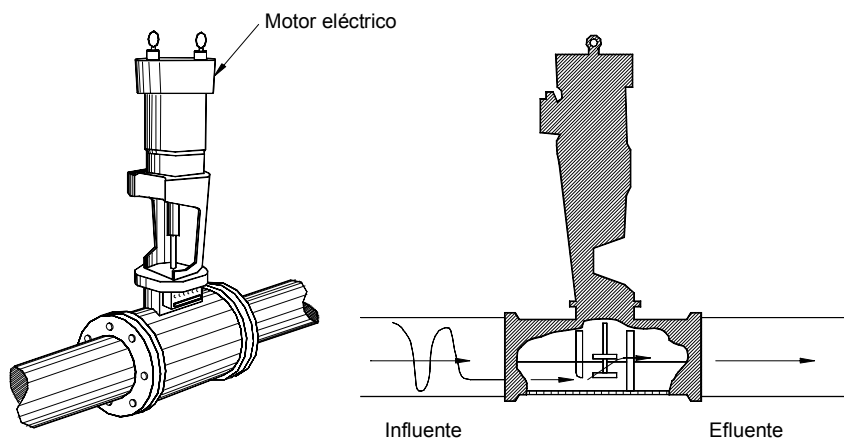
$$\frac{n}{n_o} = \left( \frac{G}{G_o} \right)^{2/3} \quad (29)$$

con  $G_o = 600 \text{ s}^{-1}$  y  $n_o = 153 \text{ r.p.m}$ , resulta:

$$n = 153,5 \left( \frac{200}{600} \right)^{2/3} = 74 \text{ r.p.m}$$

Admitiendo un rendimiento mínimo del conjunto motor eléctrico y reductor igual a 0,8, la potencia necesaria del motor eléctrico será  $1,65 / 0,8 \cong 2 \text{ HP}$ .

Una turbina puede colocarse en el conducto que conduce agua cruda constituyendo un mezclador mecánico en línea como muestra la **Figura 18**. Estos dispositivos producen gradientes del orden del  $5000 \text{ s}^{-1}$  o superiores y tiempos de mezcla del orden de fracción de segundo.



**Figura 18.** Mezclador mecánico en línea

Como ya se comentó anteriormente, la principal desventaja de los mezcladores hidráulicos es su falta de flexibilidad en términos de GT. Por el contrario la facilidad de ajustar el gradiente de velocidad permite mantener un GT óptimo en los mezcladores mecánicos con sólo variar la velocidad de rotación. Otras ventajas de los mezcladores mecánicos son:

- Facilidad de diseño, construcción e instalación.
- Bajo costo.
- No producen pérdida de carga hidráulica.

Como desventajas los mezcladores mecánicos consumen energía eléctrica, debido a las pérdidas en los equipos electromecánicos. La energía disipada es generalmente superior a la energía hidráulica disipada en los mezcladores hidráulicos. Por otra parte no constituyen una alternativa adecuada en los países en desarrollo donde no se cuenta con facilidades para el mantenimiento de los equipos y la inmediata reposición de piezas.

Los mezcladores en línea, que producen gradientes de velocidad entre  $3000$  a  $5000 \text{ s}^{-1}$  y tiempos de mezcla usualmente inferiores a  $1 \text{ seg.}$ , deben ser utilizados preferentemente cuando el mecanismo predominante de la coagulación es el de adsorción-desestabilización. Cuando predomina el mecanismo de coagulación por arrastre se debe hacer la mezcla rápida en una cámara con una turbina (retromezclador), con tiempos de mezcla de  $1$  a  $7 \text{ seg.}$  y gradientes de velocidad entre  $300$  a  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

## 7.5. MEZCLA NEUMÁTICA

Los difusores de aire, comúnmente utilizados en el tratamiento aeróbico de desagües cloacales, se emplean en algunas circunstancias, en el tratamiento de agua en las etapas de mezcla rápida y floculación, ya que presentan algunas ventajas cuando es necesaria la aeración y/o la clarificación por flotación. Se adaptan fácilmente a las estructuras hidráulicas existentes, siendo por ello una alternativa interesante en la ampliación u optimización de una planta de tratamiento. Son particularmente aplicables en canales de gran profundidad o en tramos verticales de conductos.

El gradiente de velocidad es controlado por el flujo de aire. Las burbujas de aire producidas por el difusor ascienden por el tanque de mezcla provocando la circulación del líquido. La potencia disipada se computa tanto por la fuerza de arrastre entre las burbujas y el agua, como por la expansión adiabática o isotérmica del aire. Según Camp (1955), cualquiera sea el método utilizado, la diferencia en el cálculo del gradiente de velocidad no es significativa. La potencia disipada en una expansión isotérmica es:

$$P = \rho g Q_{ar} P_a \ln \left( \frac{H + P_a}{P_a} \right) \quad (30)$$

donde  $\rho$  = densidad del agua (Kg.m<sup>-3</sup>)  
 $g$  = aceleración de la gravedad (m.s<sup>-2</sup>)  
 $Q_{ar}$  = caudal de aire (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)  
 $P_a$  = presión atmosférica local (m.c.a.)  
 $H$  = profundidad de instalación del difusor (m.c.a.)

Para obtener un determinado gradiente, el caudal de aire es:

$$Q_{ar} = \frac{\mu V G^2}{\rho g P_a \ln \frac{H + P_a}{P_a}} \quad (31)$$

$V$  = volumen en el que se produce la mezcla (m<sup>3</sup>)

Para la mezcla rápida no importa mucho el tamaño de las burbujas. En la floculación es preferible un difusor de burbujas finas, preferentemente de diámetro inferior a 0,1 mm, debido a que los gradientes de velocidad en el desplazamiento de las burbujas son proporcionales a sus diámetros.

Existen problemas con la espuma, dependiendo del coagulante utilizado y de la presencia de algas, perjudicando a la sedimentación y a la filtración subsiguientes. Por otro lado, el aire agregado a los flóculos, es favorable a la flotación, siendo de este modo, la mezcla y/o la floculación por aire difuso indicada especialmente para ese proceso de clarificación.

### Ejemplo 10

En la estación de tratamiento del ejemplo anterior, el agua cruda llega a la cámara de llegada por una canalización vertical con 40" (1,02 m) de diámetro. Considerar la posibilidad de uso de esta canalización para la mezcla rápida por aire difuso sustituyendo al mezclador mecánico, dimensionando el compresor de aire para la condición de máximo gradiente ( $G = 600 \text{ s}^{-1}$ ). La estación se situará en un lugar a 250 m sobre el nivel del mar.

*Solución:*

1). Datos Diámetro de la canalización  $D = 1,02 \text{ m}$

Tiempo de mezcla  $T = 2,5 \text{ s}$

$$G = 600 \text{ s}^{-1}$$

$$V = 3,0 \text{ m}^3$$

$$\rho = 999,13 \text{ Kg.m}^{-3}$$

$$\mu = 0,001139 \text{ N.s.m}^{-2}$$

2). Profundidad de instalación del difusor de aire

$$H = \frac{V}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{3}{\frac{\pi (1,02)^2}{4}} = 3,67 \text{ m} \approx 3,70 \text{ m}$$

3). Presión atmosférica local

La presión atmosférica en metros de columna de agua varía con la altitud  $Z$  según la expresión

$$P_a = 10,33(1 - 2,26 \cdot 10^{-5} Z)^{5,256} \quad (32)$$

donde:  $Z$  = altitud sobre el nivel del mar

Aplicando

$$P_a = 10,33(1 - 2,26 \cdot 10^{-5} \cdot 250)^{5,256} = 10,03 \text{ m}$$

4). Caudal de aire

$$Q_{ar} = \frac{1}{\rho g} \left( \frac{\mu}{P_a} \frac{VG^2}{\ln \frac{H + P_a}{P_a}} \right) = \frac{1}{999,13 \cdot 9,807} \frac{0,001139 \cdot 3,0 \cdot (600)^2}{10,03 \cdot \ln \frac{3,70 + 10,03}{10,03}} =$$

$$= 0,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 144 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

5). Potencia disipada en el agua por la expansión isotérmica del aire

$$P = \rho g Q_{ar} P_a \ln \frac{H + P_a}{P_a} = 999,13 \cdot 9,807 \cdot 0,04 \cdot 10,03 \cdot \ln \frac{3,70 + 10,03}{10,03} =$$

$$= 1.234 W = 1,66 HP$$

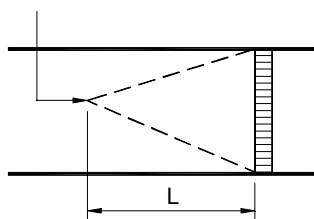
6). Elección del equipamiento

En la determinación de la presión de salida del compresor se debe computar las pérdidas de carga en la canalización de aire y en el difusor. Con un incremento del 15% en la presión, la potencia de salida del compresor pasa a  $1,15 \cdot 1,66 = 1,90$  HP.

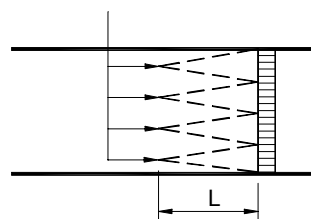
El compresor más indicado para las condiciones de trabajo – baja presión y gran caudal de aire – es el tipo “roots”. Admitiendo un rendimiento máximo de 0,6, el motor eléctrico deberá tener una potencia mínima de  $1,9/0,6 = 3,2$  HP, o sea una potencia nominal (de placa) 3 1/2 ó 4 HP.

## 7.6. INYECCIÓN DEL COAGULANTE Y LOCALIZACIÓN DE LA UNIDAD DE MEZCLA

La forma de incorporar el coagulante en el dispositivo de mezcla rápida es fundamental para la eficiencia de la coagulación y de los procesos subsiguientes.



Un punto de aplicación tiempo de mezcla T



Cuatro puntos de aplicación tiempo de mezcla T/4

**Figura 19.** Principio de los difusores

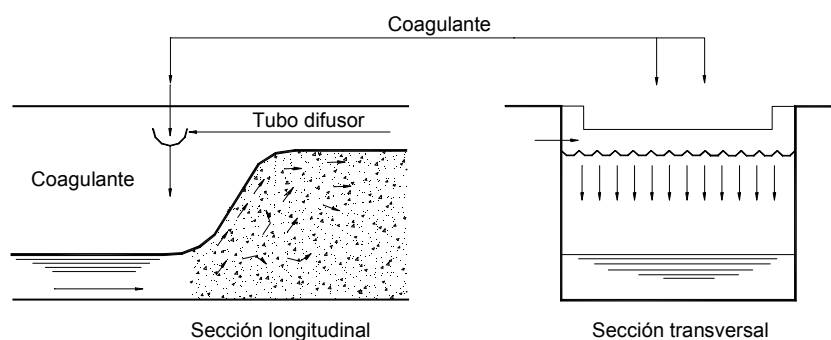
Como se ve en la **Figura 19**, con un único punto de aplicación en un canal o canalización, la mezcla sólo se completará a una distancia L, pudiendo resultar un tiempo prolongado inadecuado para la coagulación.

Cuando mayor es el número de puntos menor será la distancia L y el tiempo para completar la mezcla y mejor será la dispersión del coagulante. Esto condujo al empleo de mallas difusoras en canalizaciones preconizadas por Stenkist y Kaufman (1972), que

fueron muy populares en la década del setenta y empleadas en diversas instalaciones, algunas de gran porte como la estación de Rio Grande, en São Paulo, Brasil.

Una malla difusora está constituida por una serie de tubos insertados en un canal o canalización, dotados de orificios para la dispersión del coagulante. Según Stenkist y Kaufman, serían necesarios por lo menos 16 orificios por decímetro cuadrado para obtenerse resultados mejores que los logrados con mezcladores mecánicos.

Tal cantidad de orificios implica un diámetro muy pequeño para cada orificio, lo que provoca una frecuente obstrucción y necesidad de limpieza o remoción del difusor. Con la tecnología actual de mezcladores estáticos en línea, las mallas difusoras dejaron de usarse. Sin embargo sus principios básicos se aplican en canales abiertos.



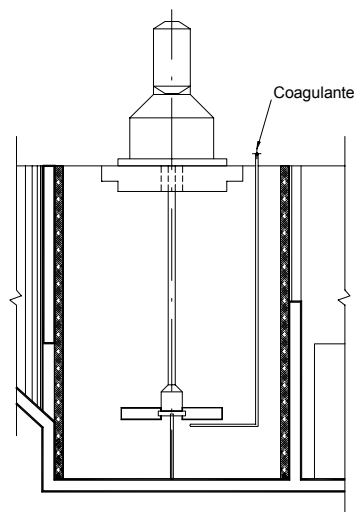
**Figura 20.** Difusor en un resalto

En canales abiertos donde se produce un resalto hidráulico, el coagulante debe aplicarse inmediatamente antes de la zona de turbulencia, donde la lámina del agua tiene menor profundidad (menor que la profundidad crítica), por medio de un tubo o canaleta perforada (**Figura 20**).

La separación entre los orificios no debe ser mayor de 15 cm, preferentemente 10 cm. En resaltos con número de Froude menores a 2,5, existe la tendencia de parte de la corriente líquida que entra en el resalto, a pasar por el fondo sin turbulencia y en consecuencia no incorpora el coagulante en el tiempo debido. Esto se evita por ejemplo, por medio de rugosidad artificial en el fondo del canal, con deflectores metálicos por ejemplo.

En mezcladores mecánicos tipo turbina, el coagulante debe aplicarse un poco por debajo del impulsor (**Figura 21**).

Como regla general, la unidad de mezcla rápida debe quedar lo más próxima posible de los tanques de floculación. La situación ideal es la floculación inmediatamente a continuación de la mezcla rápida. Cuando ello no sea posible se deben adoptar medidas para que el gradiente en el conducto entre la mezcla rápida y la entrada a los floculadores, no sea menor que el gradiente inicial de la floculación.



**Figura 21.** Punto de aplicación del coagulante en la mezcla rápida con una turbina de flujo radial

Criterios a tener en cuenta en la selección del sistema de mezcla.

- *Flexibilidad* – Como se comentó anteriormente los dispositivos hidráulicos tipo resalto son poco flexibles frente a variaciones de caudal, por lo que cuando se prevé amplias variaciones en el caudal a tratar en la planta se debe preferir mezcladores mecánicos.
- *Oportunidad* – De contar en el ingreso a la planta con una válvula globo ó mariposa, un resalto hidráulico o una canaleta Parshall (para medir caudales), conviene verificar la posibilidad de utilizarlos como mezclador.
- *Facilidad constructiva* – En general las cámaras de mezcla para los sistemas mecánicos son más fáciles de construir y sus dimensiones menos críticas en cuanto a la exactitud de sus medidas.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- Ver Fundamentación – Capítulo VII - 7 – Flocculación.

## 9. ANEXO - CONDICIONES DE MEZCLA EN CANALETAS PARSHALL

Número de Froude, tiempo de mezcla y gradientes de velocidad en función del caudal para diversos tamaños

Q	W=( m)	0,305			0,457			0,610			0,915			1,220			1,830	
(l/s)	F <sub>1</sub>	T(s)	G(s <sup>-1</sup> )	F <sub>1</sub>	T(s)	G(s <sup>-1</sup> )	F <sub>1</sub>	T(s)	G(s <sup>-1</sup> )	F <sub>1</sub>	T(s)	G(s <sup>-1</sup> )	F <sub>1</sub>	T(s)	G(s <sup>-1</sup> )	F <sub>1</sub>	T(s)	G(s <sup>-1</sup> )
60	3,2	0,8	1190															
80	2,9	0,85	1100	3,3	0,7	1290												
100	2,7	0,9	1040	3,1	0,8	1210	3,5	0,9	1180									
150	2,3	1,0	920	2,7	0,9	1080	3,0	0,8	1090	3,5	0,7	1380						
200	2,1	1,0	840	2,6	0,9	1000	2,7	0,85	1100	3,1	0,8	1270	3,5	0,7	1400			
400	1,7	1,05	640							2,5	0,9	1050	2,8	0,8	1160			
600				2,0	1,0	800	2,2	1,0	905	2,2	1,0	940	2,5	0,9	1040	2,8	0,8	1190
800				1,8	1,0	690	1,9	1,0	790	2,0	1,0	865	2,3	0,95	970	2,6	0,9	1100
1000							1,8	1,0	710	1,9	1,0	800	2,1	1,0	900	2,4	0,9	1040
1500													1,9	1,0	790	2,1	1,0	930
2000																2,0	1,0	860
2500																1,9	1,0	800

Nota 1: Los valores por encima de la línea quebrada presentan condiciones óptimas de mezcla con resalto estable. Los valores por debajo pueden ser aceptados con restricciones (resalto oscilante).

Nota 2: Para el cálculo se tomó una temperatura de 17,5 °C. Para otra temperatura el gradiente de velocidad debe ser multiplicado por el

factor  $K = 3,31 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}}$  donde:

$\rho$ . es la densidad en Kg/m<sup>3</sup>

$\mu$ . el coeficiente de viscosidad dinámica en N . s/m<sup>2</sup> para la temperatura dada