



Departamento de
Ingeniería Química y
Tecnología Farmacéutica
Universidad de La Laguna

Tema 4: Procesos Físico- químicos para el tratamiento del agua

Tecnologías de Tratamiento y de Gestión de las Aguas

Oliver Díaz López

Elisabet Segredo Morales

Enrique González Cabrera



ÍNDICE

1. [Pretratamiento: rejas y tamizado](#)
2. [Coagulación-floculación](#)
3. [Sedimentación y flotación](#)
4. [Filtración granular](#)
5. [Filtración mediante membranas](#)



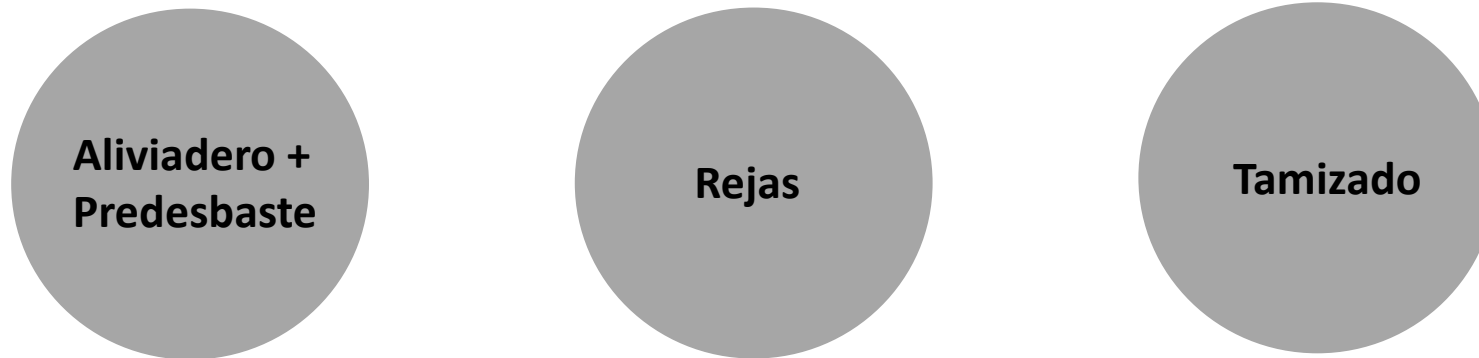
Pretratamiento: Rejas y Tamizado

CONCEPTOS GENERALES

Objetivo

- Eliminación:
 - Materias gruesas
 - Cuerpos voluminosos y arenosos
- Protección del tratamiento
- Buen funcionamiento de máquinas, equipos e instalaciones de una planta de tratamiento de aguas

Etapas habituales



ALIVIADERO + PREDESBASTE

Aliviadero

Su objetivo es evacuar el curso de agua más cercano el excedente de caudal sobre el que se ha calculado como máximo admisible para una EDAR, también puede emplearse en las tomas de ríos para ETAP.

Diseño

Se construyen un depósito de dos vasos separados con un tabique que debe tener un tiempo de retención de 20 – 30 minutos.

EDAR → Se busca recoger las primeras escorrentías que tienen contaminación alta y desechar las aguas de lluvias con baja contaminación → ALCANZAR UN COEFICIENTE DE DILUCIÓN

Pozo de muy gruesos

Elimina sólidos de gran tamaño

Diseño

- Pozo tronco piramidal invertido con paredes muy inclinadas situado a la entrada del colector.
- Permite concentrar los sólidos y las arenas decantadas que se pueden extraer.
- Está equipado con una reja de muy gruesos que impide la entrada de palos o materiales de gran tamaño
- La extracción de los residuos se realiza mediante cucharas anfibus o bivalvas
- Los lodos retirados se almacenan para posteriormente transportarlo para su gestión
- En plantas de gran tamaño:
 - Rejas de gruesos auto limpiantes
 - Instalación de Tornillo de Arquímedes

REJAS

Desbaste mediante Rejas

Elimina sólidos de gran tamaño

Puede que no se instale ni un pozo de gruesos ni un pre-desbaste

Diseño

- Sistema de barras paralelas inclinadas
- Ángulo de inclinación: 30 – 60°
- Las rejas pueden ser:
 - Gruesas: distancia entre barrotes 5 - 10 cm
 - Finas: distancia entre barrotes de 1,5 - 3 cm
- Las rejas se instalan en un canal cuya velocidad de circulación debe ser 0,3 – 0,6 m/s
- Pueden tener sistema de limpieza manual o mecánica
- Los sólidos retirados se almacenan para su gestión

Sistemas de limpieza

Manual

Automático

Acceso a video de funcionamiento



TAMIZADO

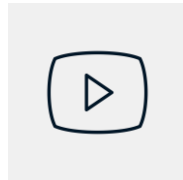
Tamices

Eliminar material de tamaño medio

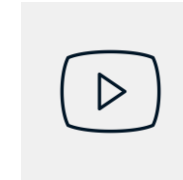
Diseño

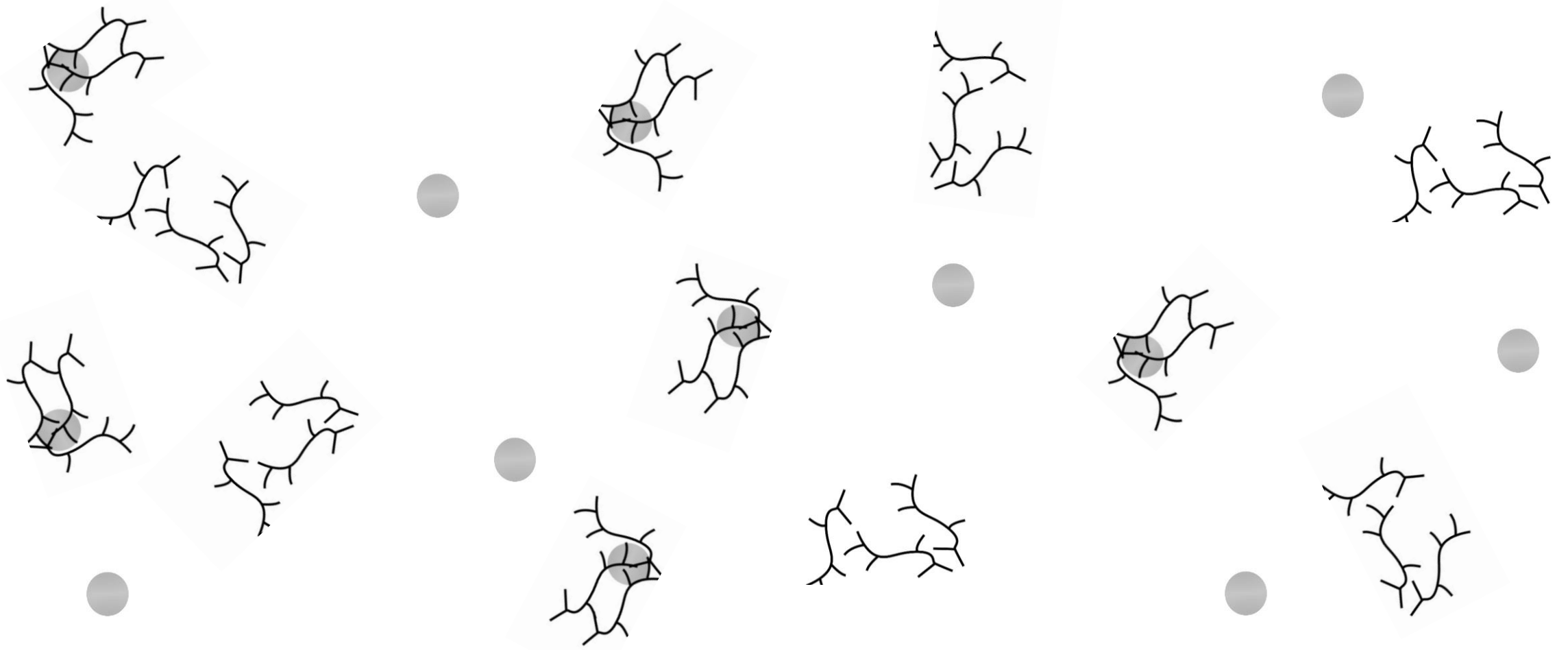
- Consiste en una filtración sobre un soporte fino
- Pueden permitir un corte de 10 mm – 0,3 mm

Acceso a video de
funcionamiento I

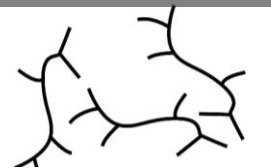
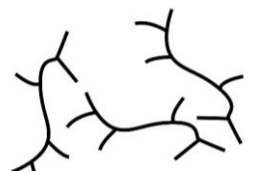


Acceso a video de
funcionamiento II





Coagulación y Floculación



COAGULACIÓN vs FLOCULACIÓN

¿Es el mismo proceso?

La terminología no ha sido estandarizada, en literatura especializada y en el sector del tratamiento del agua se usa de manera global el termino de **coagulación** al proceso de **coagulación-floculación**.

Proceso de Coagulación-Floculación

Proceso por el que las partículas se aglutinan en pequeñas masas con tamaño y densidad superior a la del agua llamadas flóculos.

Coagulación:

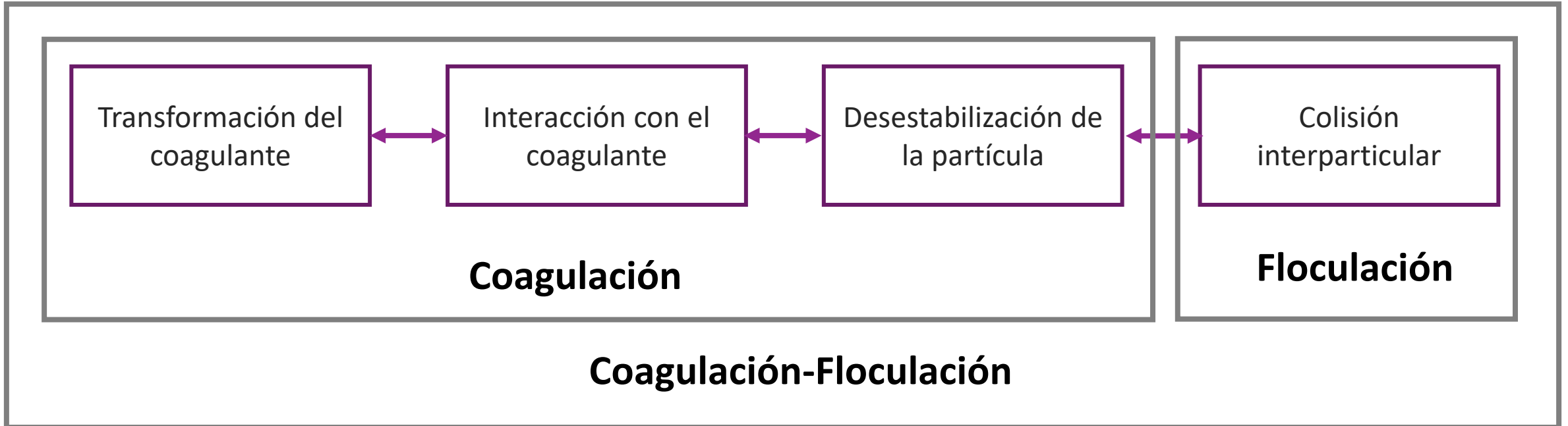
- Proceso de desestabilización química de la partícula para incrementar la tendencia de pequeñas partículas a aglomerarse para incrementar su tamaño.
- Modifica las cargas superficiales de las partículas
- Proceso rápido en una unidad de mezcla rápida

Floculación:

- Proceso físico de interacción entre las partículas para formar flóculos
- Se puede emplear un químico distinto al coagulante que se dosifica después
- Proceso lento que se realiza en una unidad de mezcla relativamente lenta

ETAPA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Proceso complejo que engloba diferentes etapas de transferencia de masas y reacciones químicas



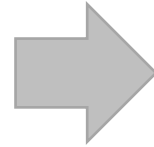
Proceso que actúa como pretratamiento de una unidad de separación de partículas

Modificar químicamente las partículas presentes en una suspensión acuosa que faciliten su separación en etapas posteriores incrementando el rendimiento de eliminación de unidades de sedimentación, flotación o filtración

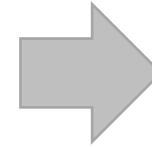
OBJETIVOS

Composición de las partículas en el agua

- Microorganismos
- Fibras
- Algas
- Precipitados orgánicos
- Materia Orgánica
- Metales tóxicos



Partículas están en estado coloidal que no se pueden separar eficientemente



La Coagulación-Floculación es crucial para agregar a los coloides y permitir su separación

La coagulación-floculación permite:

- Eliminar turbidez: sustancias orgánicas e inorgánicas en estado coloidal que no se pueden sedimentar
- Eliminar bacterias, virus, algas y patógenos: el uso de esta técnica implica una menor presión sobre la etapa de desinfección y reduce la formación de subproductos de la cloración
- Elimina sustancias productoras de sabor y olor: como por ejemplo sustancias húmicas
- Precipitados químicos
- Crítico en la eliminación de arcillas en procesos de potabilización

COLOIDES

Tipos:

Coloides hidrófobos

- Importantes en las aguas naturales
- Ejemplos:
 - Arcillas
 - Óxidos metálicos
- Son más termodinámicamente inestables

Coloides hidrófilos

- Pueden ser
 - Moléculas grandes
 - Micelas: Agregados de moléculas pequeñas
- Abarca muchos polímeros naturales y sintéticos como proteínas, ácidos nucleicos o polisacáridos
- Responsable del color del agua

Características:

○ Carga

- Por adsorción de iones OH^- sobre el material inerte. Por ejemplo, óxidos de Silicio o Aluminio
- Sustituciones de átomos en la red cristalina (Al sustituyendo a Si; Mg sustituyendo a Al)
- Ionización de las sustancias. Compuestos con grupos funcionales polares como hidroxilos, carboxilos, fosfatos, sulfatos tienden de manera natural a adquirir carga o a ionizar
- Estructuras biológicas que en su estructura poseen grupos funcionales carboxilos o amino que en función del pH del medio y su punto isoeléctrico presentan carga

○ Pequeño tamaño

ESTABILIDAD DE LOS COLOIDES

Fuerzas de estabilización o repulsión entre partículas

En el movimiento de las partículas dentro de una suspensión existen unas fuerzas que las atraen o las repelen entre sí o con superficies inertes.

- **Fuerzas de estabilización o repulsión de las partículas**
 - *La carga de las partículas*
 - *La hidratación de las partículas*: importante en coloides hidrófilos
- **Fuerzas de desestabilización o atracción de las partículas**
 - *Gravedad*: no tiene importancia sobre los coloides
 - *Movimiento Browniano*: permite el contacto entre las partículas
 - *Fuerzas de Van der Waals*: fuerza débil que permite la atracción entre las partículas
 - Origen eléctrico
 - Principal fuerza atractiva entre los coloides
 - Siempre son atractivas
 - Decece con la distancia
 - Se produce por dipolos permanentes o inducidos en las partículas

ESTABILIDAD DE LOS COLOIDES

Teoría de la estabilidad: Doble Capa Eléctrica

La teoría de la **Doble Capa Eléctrica** (“Double electric Layer”) describe la estabilidad de los coloides, puesto que modela la superficie intermedia entre la partícula coloidal y el seno del líquido.

- **Capa superficial del coloide**
 - *Cargada negativamente*
 - *Potencial eléctrico de Nerst*
- **Capa de Stern**
 - *Cargada positivamente*
 - *Atraídas fuertemente al coloide*
 - *Potencia de Stern*
- **Capa difusa de Gouy-Chapman:**
 - *Iones móviles hasta la superficie neutra del líquido*
 - *Potencial Zeta*

Potencial Zeta

El potencial eléctrico generado por la partícula coloidal cargada decrece con la distancia hasta tener efectos inapreciables

- Se define como el valor de la diferencia de potencial entre el límite de solución rígidamente unida a la partícula y la masa de líquido
- Este potencial impide el acercamiento entre las partículas por las Fuerzas de Van der Waals
- Aparece el fenómeno de repulsión de carga electrostática entre cargas de igual signo

En la práctica

Se puede considerar al potencial eléctrico como la presión eléctrica que hay que aplicar para unir cargas de mismo signo. La formación de agregados de partículas dependerá la posibilidad de reducir el potencial Zeta

MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN

- La desestabilización es el proceso por el que las partículas estables en una suspensión se modifican y se incrementa la tendencia a agregarse
- Existen varios mecanismos de desestabilización
- El tipo de mecanismo depende de:
 - Dosis del coagulante
 - pH
 - Conductividad del agua y el contenido en materia orgánica

MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN

COAGULACIÓN

FLOCULACIÓN

Compresión de
la Doble Capa

Neutralización
de cargas

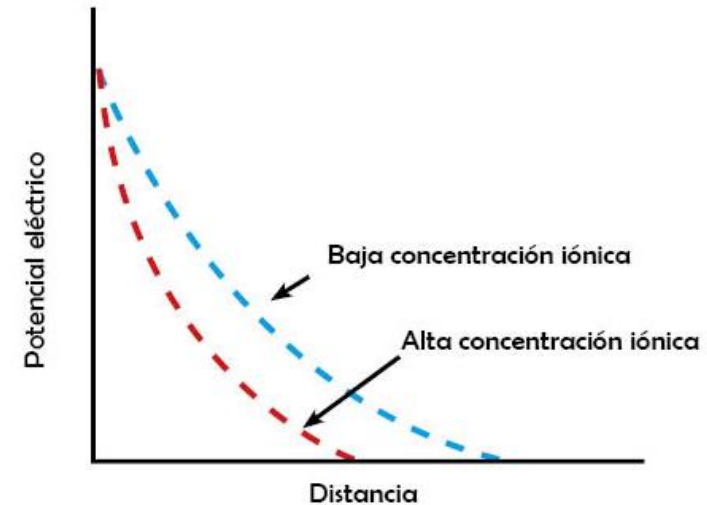
Barrido o
Inclusión

Puente de
partículas

MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN

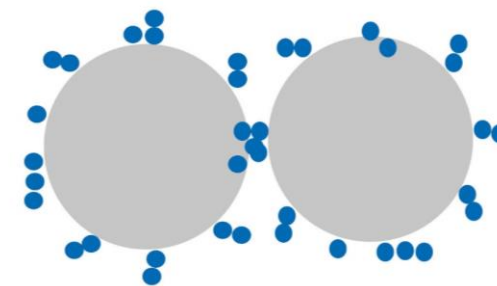
Compresión de la doble capa

- Se adiciona un electrolito simple (NaCl)
- Se incrementa la carga reduciendo el potencial Zeta
- Se requiere altas concentraciones de sal
- Responsable de la coagulación natural producida en estuarios

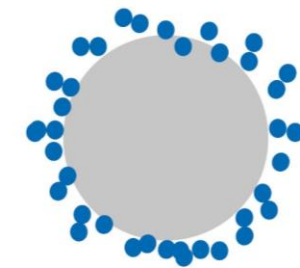


Neutralización de la carga

- Se introduce un coagulante de carga opuesta a la superficie del coloide y se adsorbe a la superficie
- Reducir la carga neta de la superficie del coloide
- Se reduce la capa de difusión
- Se forman flóculos blandos
- Sobredosificación: la carga de la suspensión se modifica y existe el riesgo de estabilización



Neutralización de la Carga

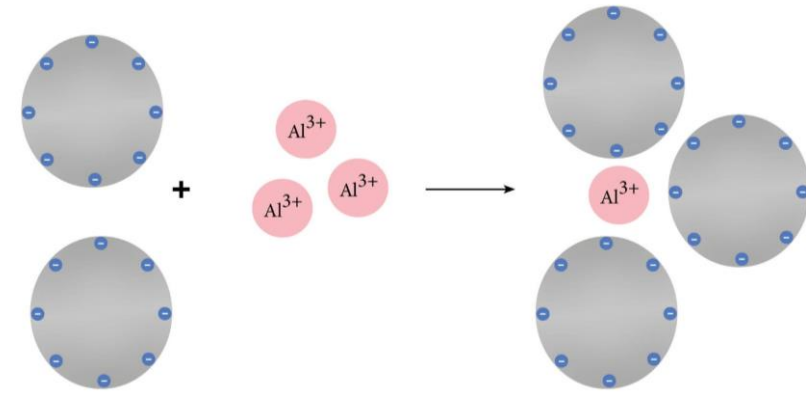


Reinversión de la carga

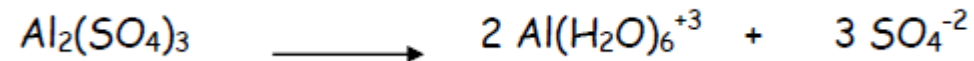
MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN

Barrido o inclusión

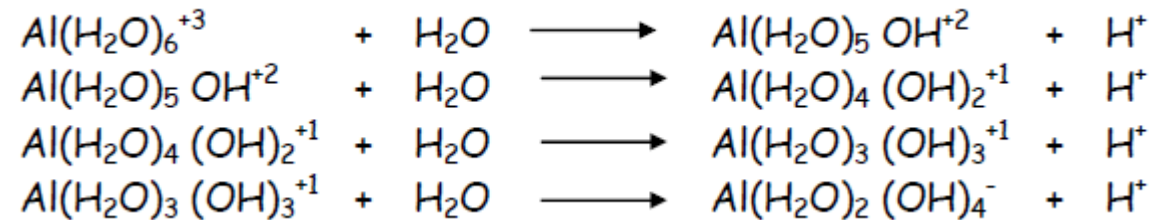
- Tiene lugar cuando se emplean sales metálicas
- Se excede el producto de solubilidad
- El coagulante se hidroliza formando hidróxidos de gran tamaño
- Los coloides se adsorben sobre estos precipitados quedando atrapados en su interior
- Se producen flóculos blandos
- No hay problemas de sobredosificación
- Proceso complejo pero que se puede describir:



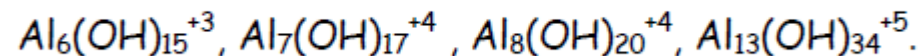
1. Disolución



2. Hidrolisis



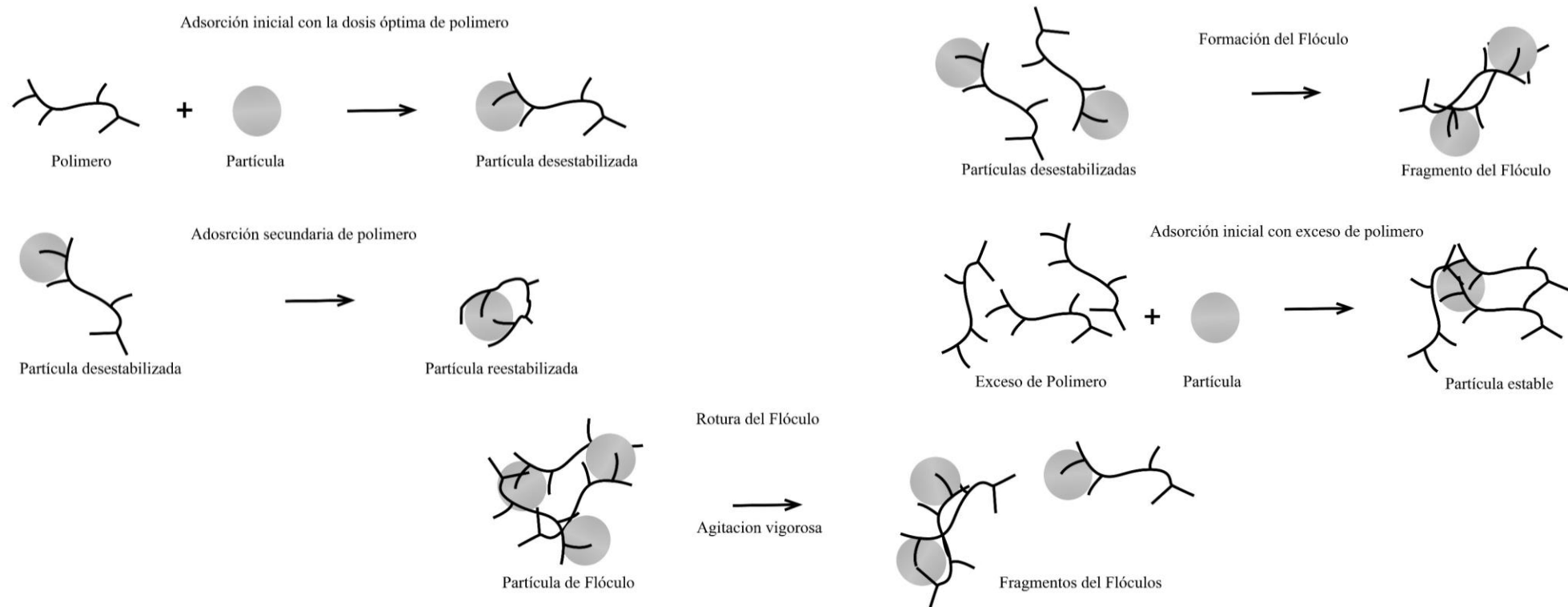
3. Polimerización



MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN

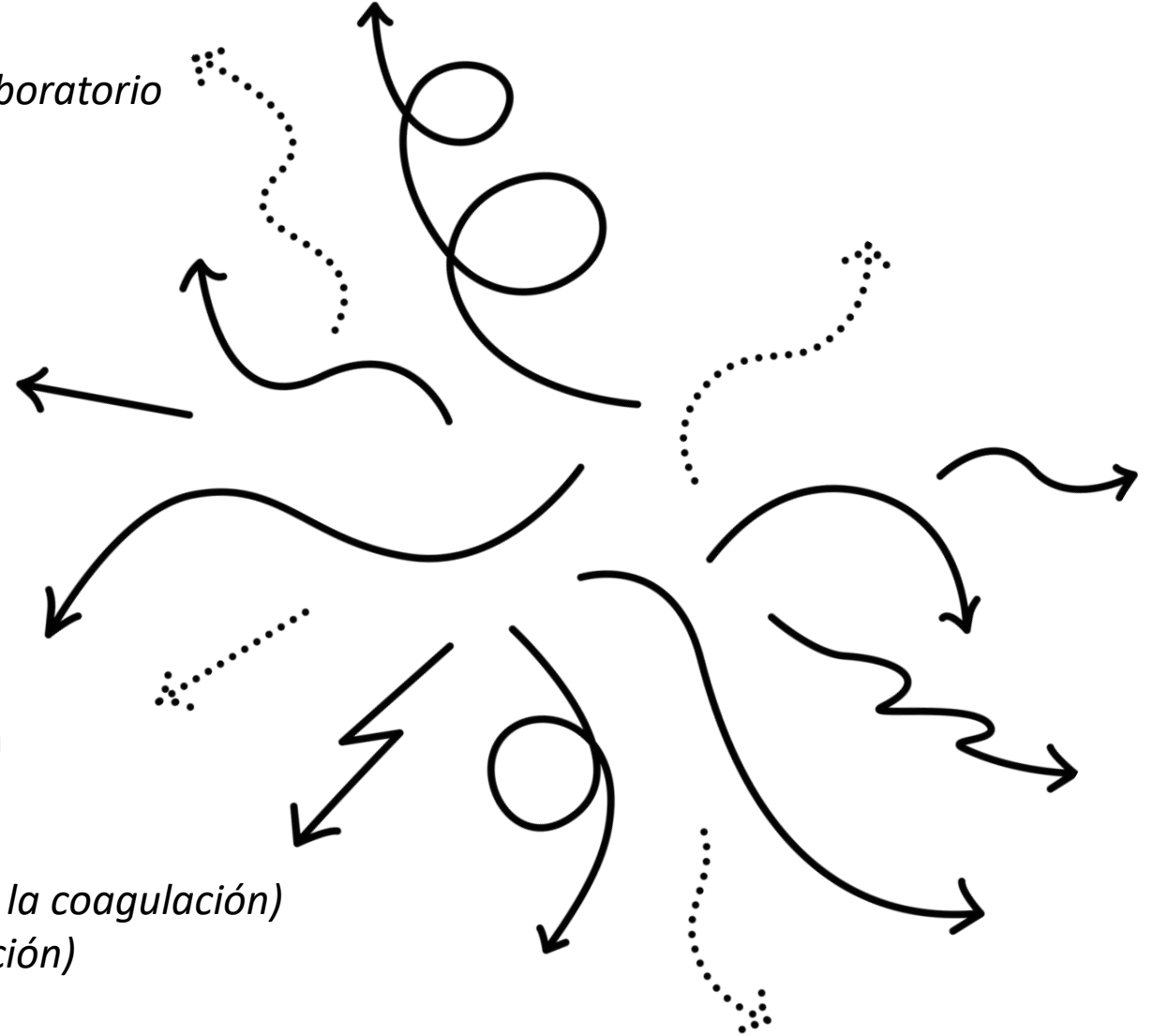
Puente de partículas

- Los químicos presentan un elevado peso molecular que interacciona con las partículas formando puentes
- Se requiere bajas dosis
- Flóculos de gran tamaño y estables
- La teoría de La Mer describe de manera cualitativa el fenómeno de puente de partículas



FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE EL PROCESO

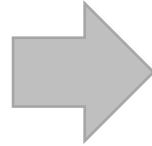
- **Tipo y cantidad del coagulante**
 - *Se debe analizar la dosis óptima en ensayos de laboratorio*
 - *Se debe evitar la sobredosisificación*
- **pH del agua:**
 - *Zona óptima de pH de trabajo*
- **Tiempo de mezcla y floculación**
 - *Se debe analizar en ensayos de laboratorio*
 - *Evaluar volúmenes muertos*
- **Temperatura**
- **Interferencia con otros reactivos presentes en el agua**
- **Agitación y presencia de núcleos**
 - *Dispersión de los químicos (Agitación rápida para la coagulación)*
 - *Rotura del flóculo (agitación lenta para la floculación)*



COAGULANTES

Características Generales

- Carga opuesta al coloide
- Mayor valencia posible
- Alto peso molecular



El mejor coagulante es el que proporcione una carga para desestabilizar a los coloides y luego forme un flóculo sobre el que se adsorben el resto de los coloides



- En potabilización se prioriza la formación de un flóculo voluminoso y con cinética muy rápida
- En Aguas Residuales se requiere una elevada carga

Coagulantes inorgánicos

- Sales de sulfato o cloro con metales como el Aluminio y el Hierro
- Ejemplos:
 - Sulfato de alúmina
 - Polímeros de aluminio
 - Cloruro férrico
 - Cloruro-sulfato férrico

Coagulantes orgánicos

- De origen animal: derivados del almidón, celulosa. Requieren la ayuda de un segundo químico.
- Sintéticos: macromoléculas de cadena larga

FLOCULANTES

Características Generales

El mejor Floculante es aquel que favorezca la formación del flóculo



- Cadena molecular larga
- Alto peso molecular

Agentes adsorbentes

- Incrementan el peso de los flóculos ligeros
- Incrementar la densidad del flóculo
- Absorben partículas coloidales
- Ejemplos:
 - Arcilla bentoníticas
 - Caliza
 - Carbón activo
 - Tierra de diatomeas

Sílice activa

- Hasta la comercialización de los polielectrolitos era el más utilizado
- Incrementa la velocidad de coagulación
- Produce flóculos de gran tamaño
- Elevado riesgo de sobredosificación
- Gran cantidad de fangos generados

Polielectrolitos

- Floculante más utilizado
- Polímeros de elevado peso molecular
- Naturales:
 - Almidones
 - Dosis altas
 - Coste bajo
- Sintéticos:
 - Moléculas portadoras de carga
 - Moléculas polimerizadas

UNIDAD DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

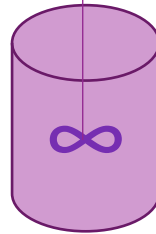
Elementos en la unidad de Coagulación-Floculación

Dosificación de coagulante

- Depósito de almacenamiento
- Bomba dosificadora

Coagulante

LÍNEA DE AGUA



Coagulación

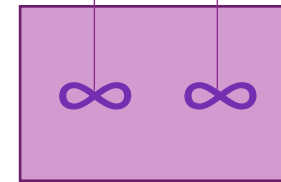
- Objetivo: neutralizar las cargas, dispersar el químico y poner en contacto las impurezas
- Unidad de mezcla rápida (0,1-100s)

Dosificación de Floculante

- Depósito de almacenamiento o unidad de preparación si es sólido
- Bomba dosificadora

Floculante

LÍNEA DE AGUA



Floculación

- Objetivo: aumentar la cantidad y el tamaño de los flóculos

ECUACIONES DE DISEÑO

INTENSIDAD DE LA MEZCLA

Gradiente de velocidad (G)

- Variación de velocidad en el eje vertical
- Unidad: s^{-1}
- Depende de:
 - Potencia consumida(W)
 - Volumen de agitación (m^3)
 - Viscosidad (Ns/m^2)

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

DIMENSIONES DE LA INSTALACIÓN

Tiempo de retención hidráulico (TRH)

- Tiempo que pasa dentro de la unidad una unidad de fluido
- Se analiza con el parámetro Gt que surge de multiplicar la expresión de G por el TRH
- Depende del caudal tratado (m^3/s)

$$Gt = G \cdot TRH = G \cdot \frac{V}{Q} = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{PV}{\mu}}$$

VALORES DE Gt

Proceso	Tiempo de Retención	G (1/s)
Coagulación	5 – 20 s	250 – 1.500
Floculación	10 – 30 min	20 – 100

MEZCLADORES DE HÉLICE Y TURBINA

Características

- Se emplean comúnmente para las unidades de coagulación
- Tipos:
 - **Con impulsores pequeños:** generan alta turbulencia ideales para la coagulación
 - **Con impulsores grandes:** generan poca turbulencia y alta circulación ideal para la floculación
- Evitar la formación de vórtices
 - Instalar el impulsor no centrado o inclinado
 - Instalación de deflectores

Energía disipada durante el mezclado

- Expresiones matemáticas propuestas por Hushton
- Se basan en las fuerzas de inercia y en las fuerzas de viscosidad

Depende del número de Reynolds

- d: diámetro del impulsor en metros
- N: número de revoluciones por segundo
- μ : viscosidad del fluido en Ns/m²
- ρ : densidad del fluido en kg/m³

$$Re = \frac{d^2 N \rho}{\mu}$$

Proceso	Régimen	Re	Potencia (W)
Coagulación	Turbulento	$>10^5$	$P = k\rho N^3 d^5$
Floculación	Laminar	<10	$P = k\mu N^2 d^3$

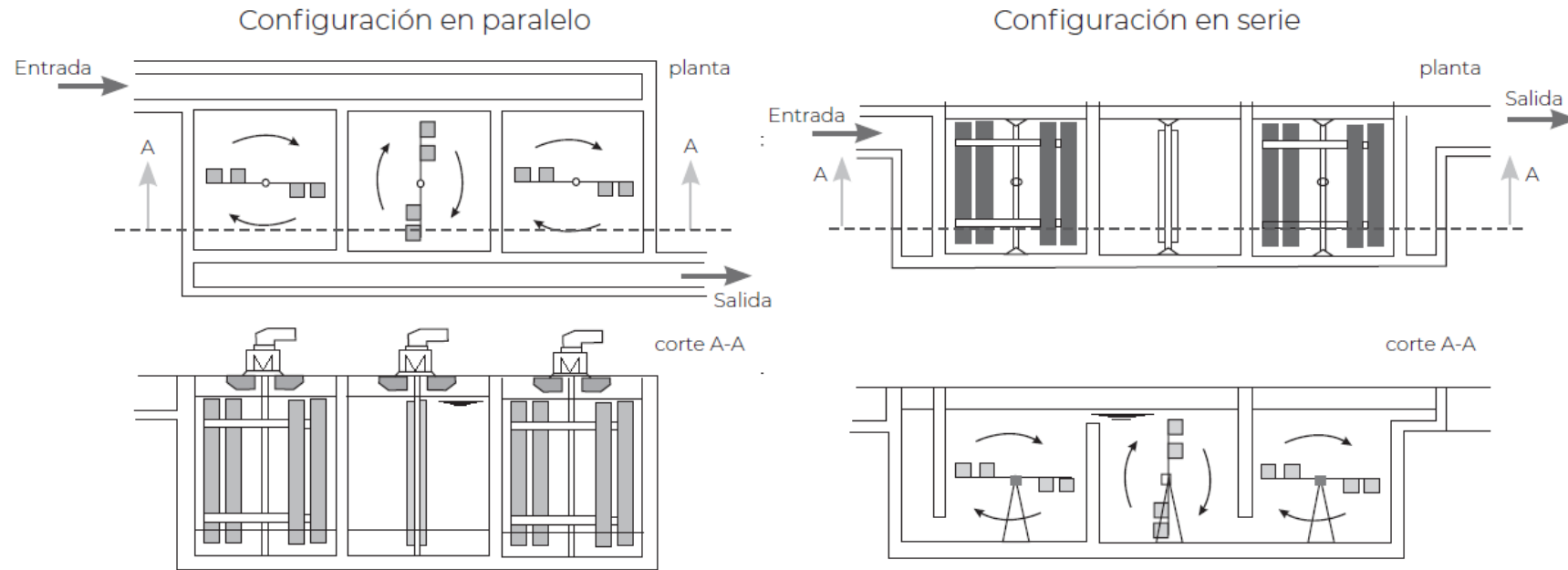
Impulsor	K (laminar)	K (turbulento)
Hélice cuadrada 3 palas	41,0	0,32
Turbinas 6 palas planas	71,0	6,30
Turbinas 6 palas curvas	70,0	4,8
Turbina cerrada 2 palas curvas	97,5	1,08

MEZCLADORES DE PALETAS

Características

- Se emplean comúnmente para las unidades de floculación
- Giran lentamente puesto que tienen una gran superficie de acción sobre el fluido

Configuración



MEZCLADORES DE PALETAS

Energía disipada durante el mezclado

$$P = F_D \cdot v_p$$

- P: es la potencia necesaria para la mezcla en W
- V_p : es la velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido en m/s. Se estima como el 75% de la velocidad en el extremo de la paleta
- F_D : es la fuerza de resistencia del fluido sobre las paletas en N

$$F_D = \frac{C_D A \rho v_p^2}{2}$$

- C_D : es el coeficiente de resistencia al avance de las paletas
- A: es el área transversal de las paletas en m^2

Parámetro G

Incluyendo las expresiones anteriores queda

$$G = \sqrt{\frac{C_D \rho A v_p^3}{2 \mu V}}$$



Sedimentación y Flotación

SEDIMENTACIÓN Y FLOTACIÓN

Conceptos generales

- Son operaciones unitarias empleadas para separar un sólido del fluido que lo transporta
- Son el principal método de separación de sólidos en el tratamiento de agua potable
- Reduce la concentración de partículas y la carga sobre los filtros granulares.
- Se reducen los costes de operación de filtros granulares
- La selección entre la sedimentación y flotación depende del:
 - Tipo de agua
 - Características específicas de la instalación: espacio, costes, normativa.

SEDIMENTACIÓN

- Se basa en el mayor peso específico de la partícula comparada con el fluido que la contiene y el efecto de la gravedad.
- Permite eliminar partículas y flóculos

FLOTACIÓN

- Se basa en la absorción y desorción de un gas de forma continua
- Se introduce burbujas finas de aire donde se adhieren las partículas
- Permite el espesado de flóculos y la eliminación de aceites

SEDIMENTACIÓN

Definición

Operación unitaria de separación en la que se aísla un material sólido del fluido que lo transporta. Se basa en la diferencia de densidad entre la partícula y el fluido, y la acción de la gravedad

Tipos de sedimentación

- La sedimentación se clasifica atendiendo a las características de la fase fluida y la fase sólida
 - La naturaleza y densidad de ambas fases
 - Tamaño y concentración de las partículas
- ➔ Establece diferentes modos de operación

PARTÍCULAS DISCRETAS

- Baja concentración de sólidos
- Las partículas actúan como elementos individuales

FLOCULENTA

- Las partículas se agregan o flocculan durante el proceso
- Las partículas incrementan su peso específico y su velocidad de sedimentación

ZONAL O RETARDADA

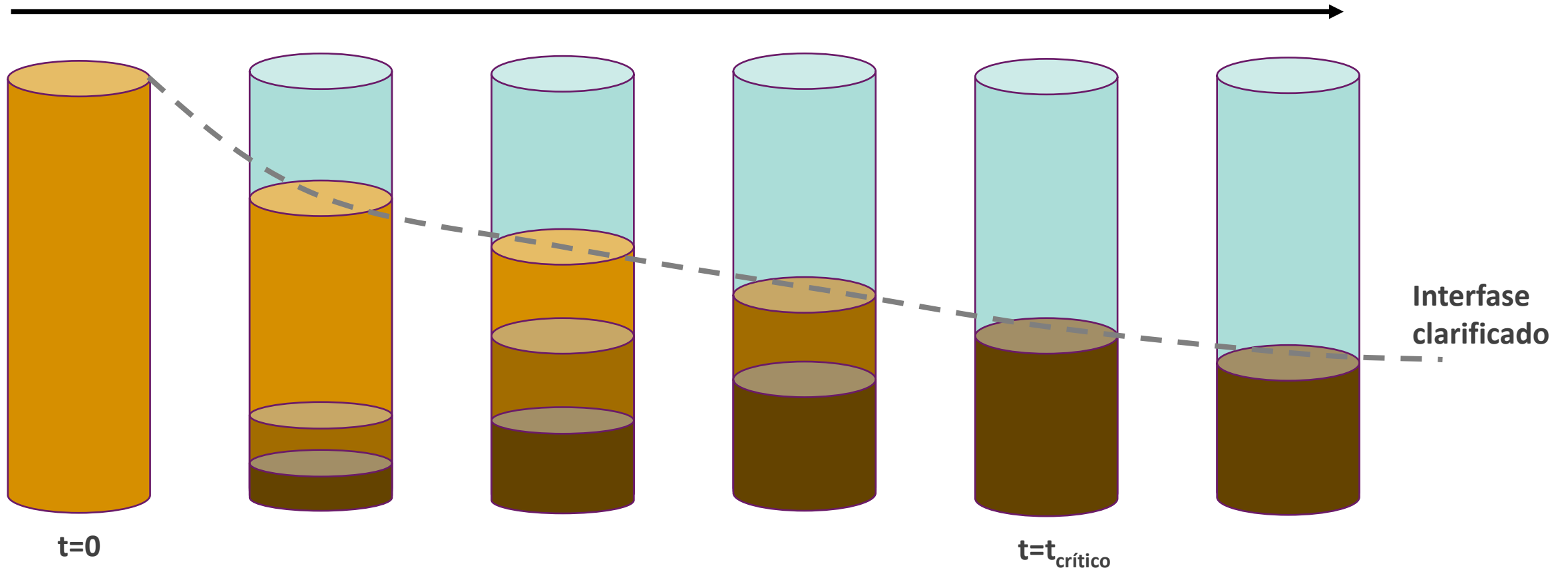
- Concentraciones intermedias de sólidos
- Hay interacción entre las partículas
- Las partículas sedimentan como una unidad

COMPRESIÓN

- Elevadas concentraciones de partículas
- Se produce una compresión estructurada de las partículas que actúan como una unidad

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE UNA SEDIMENTACIÓN

Tiempo

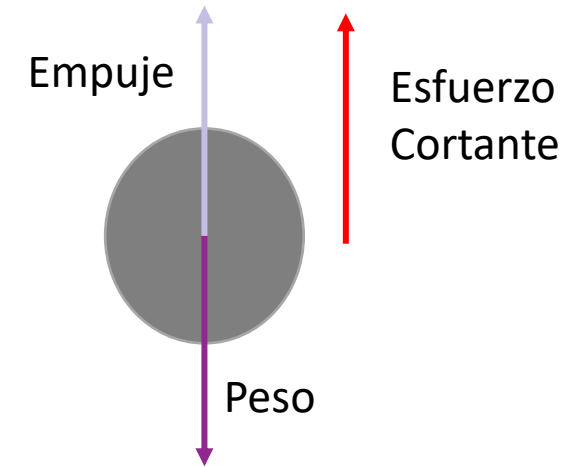


VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

La clave en los sedimentadores está en la velocidad de desplazamiento del sólido con respecto al fluido

Velocidad de sedimentación de partículas discretas

- Se considera que no existe interacción entre las partículas vecinas y actúan de manera individual
- Las partículas se consideran
 - Iguales
 - Rígidas
 - Indeformables
- Una partícula inmersa en un fluido está sometida a tres fuerzas
 - Campo gravitatorio
 - Empuje
 - Esfuerzo cortante
- La velocidad de sedimentación en estas condiciones es constante y se obtiene de igualar el peso efectivo con la resistencia por rozamiento
- Se denomina **velocidad de sedimentación terminal**



$$v_t = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_s - \rho)d_p}{C_D \rho}}$$

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Velocidad de sedimentación de partículas discretas

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho)d_p}{3C_D\rho}}$$

- v_t es la velocidad de sedimentación o terminal de la partícula en el medio estudiado.
- ρ_s y ρ son las densidades de la partícula y del fluido respectivamente
- d_p es el diámetro de la partícula
- C_D es el coeficiente de arrastre que depende del régimen de movimiento que posea la partícula.

$$Re = \frac{v_t d_p \rho}{\mu}$$

Número de Reynolds	C_D
$Re < 0,2$ (Laminar)	$C_D = \frac{24}{Re}$
$0,2 < Re < 1000$	$C_D = \frac{24}{Re \cdot 3 / \sqrt{Re}}$
$1000 < Re < 200000$	0,44

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Efecto de la forma de la partícula

- Las partículas no esféricas incrementan el valor del coeficiente de rozamiento C_D
- Se introduce el factor ϕ que multiplica al factor C_D determinado para partículas esféricas

Tipo de partícula rígida	ϕ
Arena	2,0
Carbón	2,25
Yeso	4,0
Grafeno	22

Velocidad retardada o impedida

En suspensiones concentradas las interacciones entre las partículas son tan altas que se reduce la velocidad de sedimentación

$$v_s = v_t \varepsilon^n$$

- v_s es la velocidad retardada o impedida (m/s)
- v_t es la velocidad terminal o de sedimentación (m/s)
- ε es la fracción volumétrica del líquido en la suspensión.
- n es un parámetro empírico que depende del Número de Reynolds

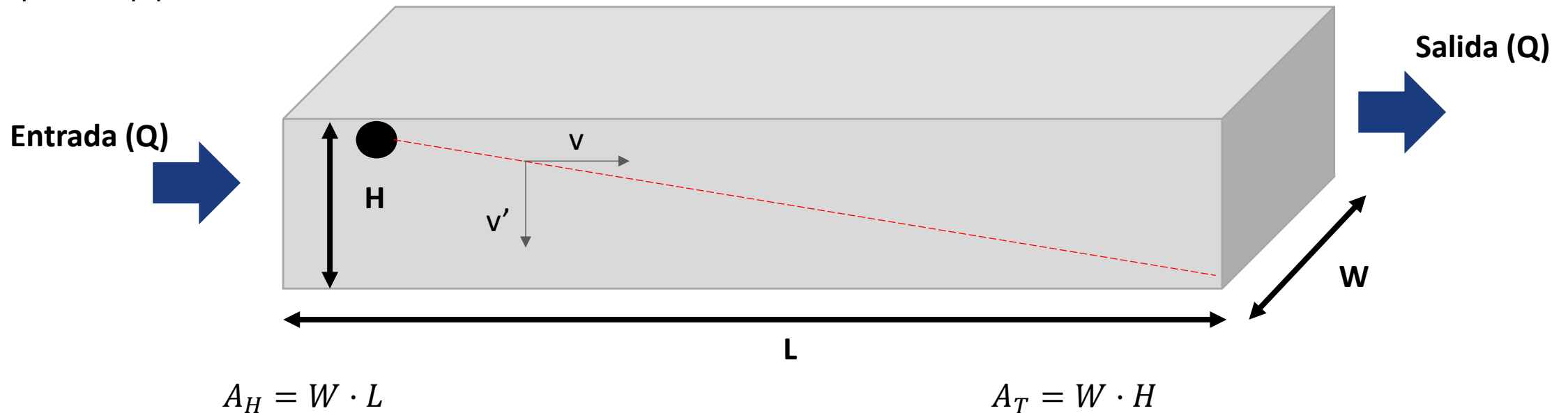
Valores de n				
$0,1 < Re < 1$	$1 < Re < 10$	$10 < Re < 100$	$100 < Re < 1000$	$Re > 1.000$
4,6	4,3	3,7	3,0	2,5

SEDIMENTADORES

Características generales

Los sedimentadores se diseñan estableciendo una superficie de sedimentación que permita que el material en suspensión que se quiera eliminar alcance una velocidad de descenso superior o igual a su velocidad de sedimentación o terminal

La sedimentación en aguas potables comúnmente se realiza en sedimentadores de flujo horizontal en forma de paralelepípedo



PREDISEÑO DE UN SEDIMENTADOR HORIZONTAL

Objetivos

Para una eficiencia de separación de un tamaño de partículas

- Áreas mínimas de trabajo que permitan la sedimentación y eviten el arrastre de partículas
- Análisis del rendimiento de cada corte granulométrico

Hipótesis

- Todas las partículas son iguales e indeformables
- Se conoce la distribución de tamaños de partículas
- Características del fluido constantes
- Se debe establecer un régimen laminar

Se debe cumplir que todas las partículas con una velocidad terminal o de sedimentación superior a un determinado valor crítico permanezcan dentro de la cámara de sedimentación

Ecuaciones de diseño

Velocidad de sedimentación

- Régimen laminar (Ecuación de Stokes)
- Ecuaciones propuestas para disoluciones diluidas y esféricas

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho)d_p}{3C_D\rho}}$$

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}}$$



Ecuación de Stokes

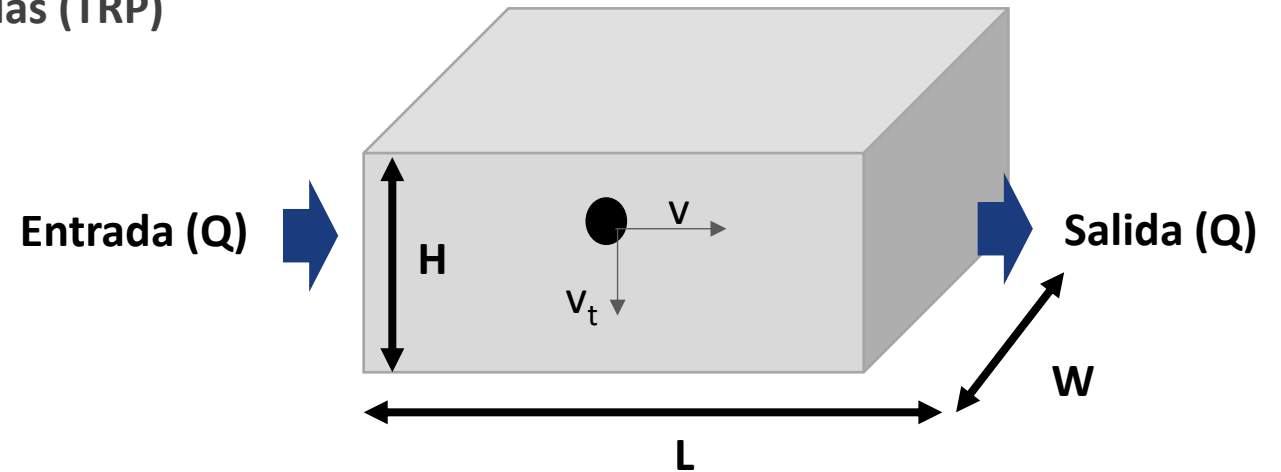
$$v_t = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu}$$

PREDISEÑO DE UN SEDIMENTADOR HORIZONTAL

Ecuaciones de diseño

Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH) y de Partículas (TRP)

- **TRH:** es el tiempo que emplea un elemento de fluido en atravesar la unidad de sedimentación
- **TRP:** es el tiempo que emplea una partícula en recorrer la altura del sedimentador
- Se debe cumplir que el $TRH \geq TRP$



$$TRH = \frac{\text{volumen}}{\text{Caudal}} = \frac{L \cdot W \cdot H}{Q} \quad \therefore \quad v = \frac{Q}{H \cdot W} \quad \longrightarrow \quad TRH = \frac{L}{v}$$

$$TRP = \frac{H}{v_t}$$

$$TRP = TRH \quad \therefore \quad \frac{L \cdot W \cdot H}{Q} = \frac{H}{v_t}$$

$$L \cdot W = \frac{Q}{v_t}$$

Carga superficial

PREDISEÑO DE UN SEDIMENTADOR HORIZONTAL

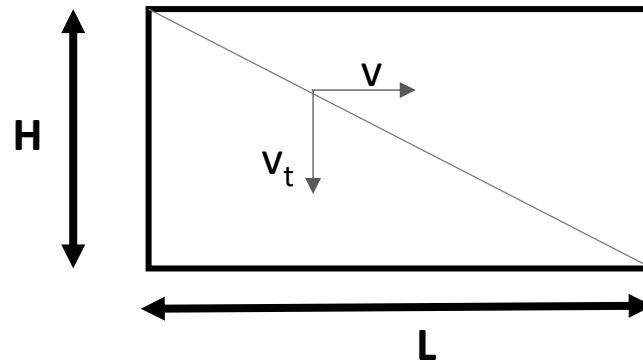
Ecuaciones de diseño

Carga superficial

- Es la relación entre el caudal alimentado y la superficie horizontal del sedimentador
- Su unidad es m^3/m^2d
- Debe ser lo suficientemente lenta para que produzca la sedimentación
- Coincide con la velocidad terminal crítica todas las partículas con velocidad de sedimentación superior se quedarán atrapadas

$$Car = \frac{Q_0}{L \cdot w_{sup}}$$

El procedimiento habitual en el diseño de estas unidades es establecer un tamaño de partículas que se desee eliminar y determinar su velocidad terminal y diseñar un área horizontal que permita que la carga superficial de la unidad coincida con la velocidad terminal



$$d_p \longrightarrow v_t \longrightarrow A_H$$

DESARENADO – DESENGRASADO

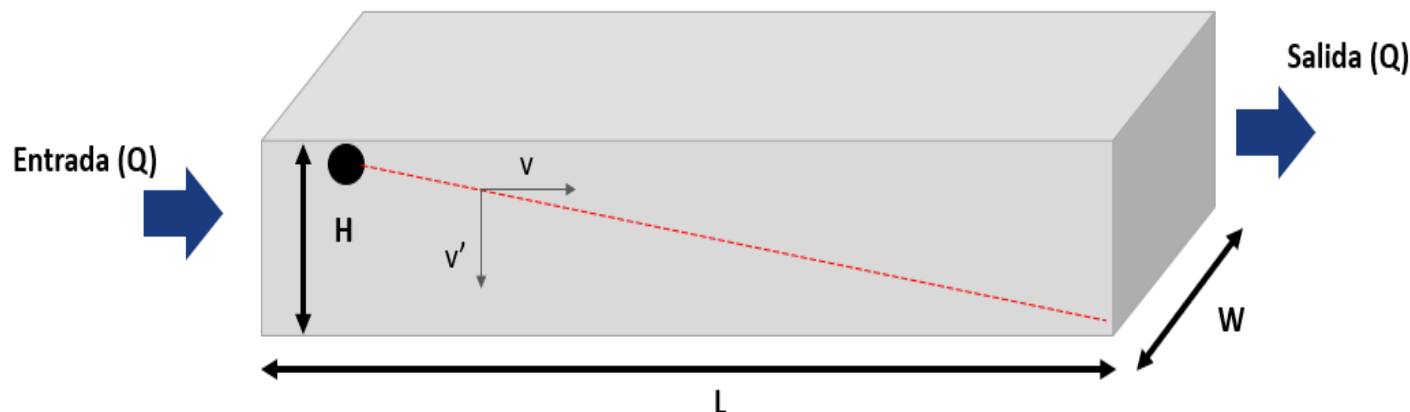
Canal de Desarenado – Desengrasado

Su objetivo es eliminar las arenas y aceites presentes en el agua residual.

Diseño como Desarenador

Se basa su diseño como un sedimentador rectangular similar a los que vimos en potabilización

El problema es que la concentración de partículas es muy superior, con una granulometría muy distinta



$$v_t = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) g}{18\mu}$$

$$L \cdot W = \frac{Q}{v_t}$$

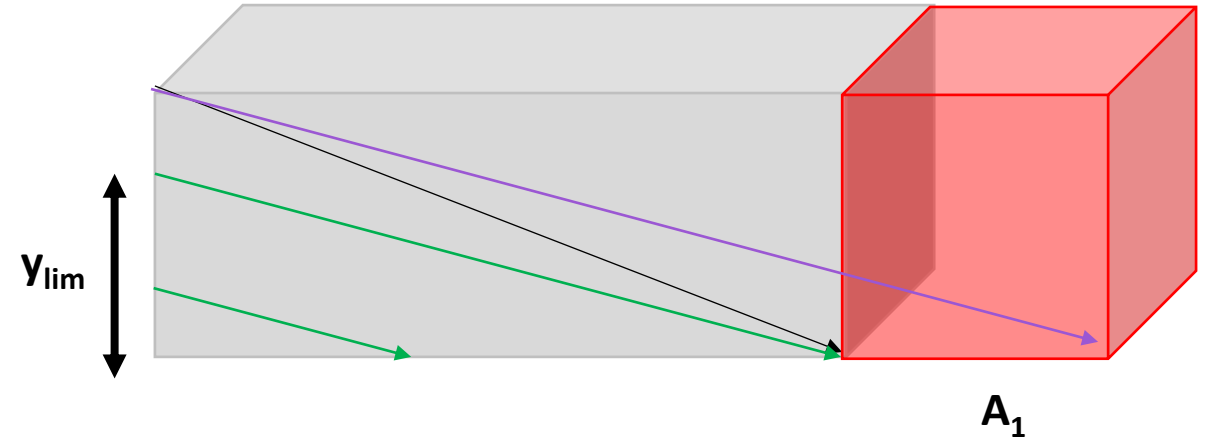
DESARENADO – DESENGRASADO

Eficacia de eliminación de partículas

Todas las partículas o material en suspensión con tamaño superior al crítico sedimentarán

¿Pero y las de tamaño inferior?

- Asumiendo modelo de sedimentación de partículas discretas sin interacción entre las partículas
- Depende de la cota de entrada
 - $y = H$
 - Las partículas no sedimentan
 - Requieren un área adicional A_1 para sedimentar
 - $y \leq y_{lim}$
 - Las partículas sedimentan



Procedimiento

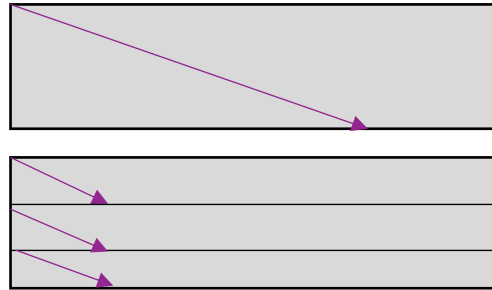
Determinar la velocidad de sedimentación de cada tamaño

$$E_i = \frac{v_{si}}{v_s}$$

$$E = \sum P_i E_i$$

SEDIMENTADOR DE VARIOS PISOS

- La eficiencia del sedimentador horizontal depende del área disponible para el proceso de sedimentación
- Incrementando el número de pisos en un mismo tanque se incrementa el rendimiento
- Se traduce en equipos más compactos
- Idóneo para lugares con limitación de espacio

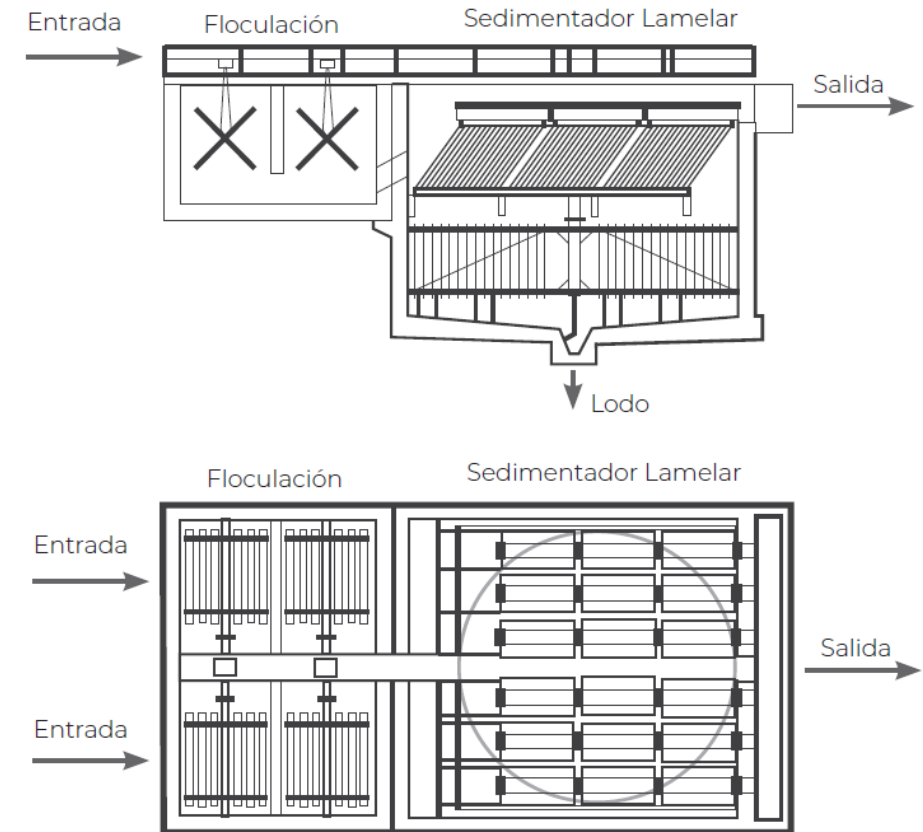


- Presentan dificultades:
 - Suportación de pisos
 - Distribución del flujo
 - Eliminación de fangos
 - Mantenimiento complejo
- De este sistema derivan los **sedimentadores lamelares o de placas inclinadas**

SEDIMENTADOR LAMELAR

Características generales

- Sistemas ampliamente usados en la sedimentación de agua potable y cada vez más usado en las EDAR como primario
- El incremento de área se consigue empleando módulos de estructuras ligeras con placas ligeras poco espaciadas
- Son sistemas ideales para favorecer la floculación de material en suspensión
- Disposición de las placas
 - Ángulo: 50°
 - Distancia de separación entre placas: 50mm
 - Longitud inclinada: 1-2m

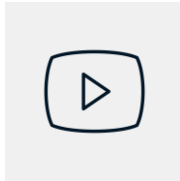


SEDIMENTADOR CIRCULAR

Características

Sedimentador clásico con forma circular y fondo cónico, permite la retirada de flotantes y de sólidos por la parte inferior

Acceso a video de funcionamiento



Sedimentadores con coagulación -floculación



VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Influencia de la Floculación

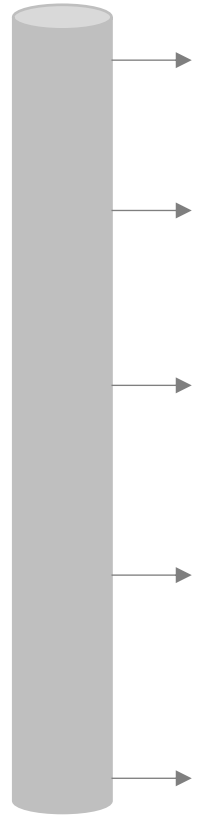
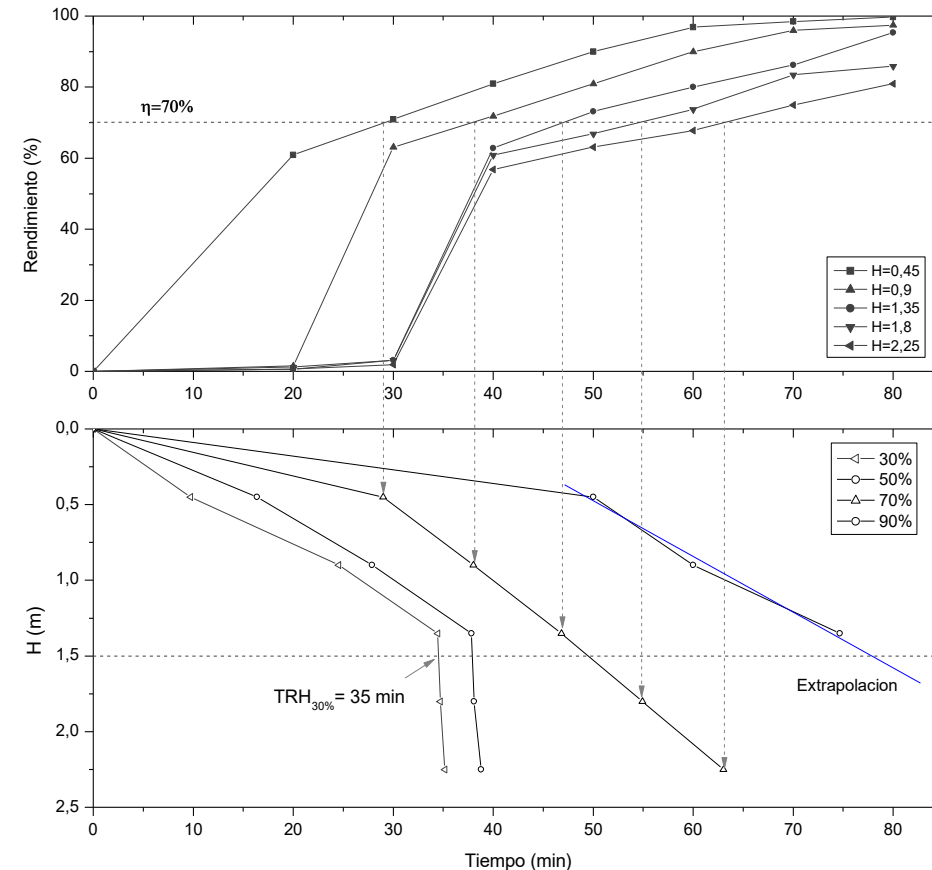
No se puede determinar un factor para corregir las expresiones porque su tamaño y forma están interrelacionados con el mecanismo de su formación y rotura en cualquier condición de flujo

Cuando existe floculación:

- Se forman estructuras irregulares
- Se incrementa el tamaño de las partículas a medida que tiene lugar la sedimentación
- Se aumenta la velocidad de sedimentación
- El efecto real solo se puede **determinar mediante ensayos de sedimentación**

Permiten determinar:

- Rendimiento porcentual y total de eliminación
- Tiempo de residencia
- Altura efectiva del sedimentador

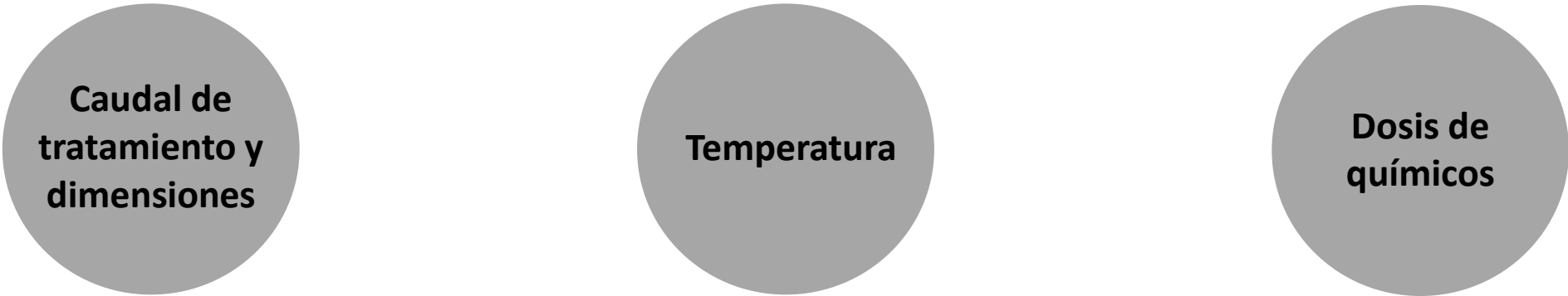


PARAMETROS DE OPERACIÓN

Control del proceso

Hay muchos parámetros que deben controlarse para evaluar correctamente a un sedimentador o clarificador. No sólo es necesario controlar la carga de contaminantes, sino que hay otros parámetros

Parámetros habituales para analizar ante un mal funcionamiento o necesidad de optimización



**Caudal de
tratamiento y
dimensiones**

Temperatura

**Dosis de
químicos**

CAUDAL DE TRATAMIENTO Y DIMENSIONAMIENTO

Dimensiones estándar

Normalmente se establece un diseño estandarizado de las unidades de sedimentación teniendo en cuenta:

- Carga superficial

- Tiempo de residencia hidráulico

$$\text{Carga superficial} = \frac{Q}{\text{Superficie}}$$

$$\text{TRH} = \frac{\text{Volumen}}{Q}$$

Sedimentador	Parámetro	Unidad	Caudal Máximo	Caudal Medio	Caudal Punta
Convencional: circular o rectangular	Carga superficial	m ³ /m ² h	<3,0	<2,5	<1,0
	TRH	h	>1	>2	>3
Lamelar	Carga superficial	m ³ /m ² h	<15	<10	<5
	TRH	h	>0,25	>0,50	>1,00

Sedimentador	Condiciones de diseño
Circular	Φ < 60 m H < 3,5 m
Rectangular	L < 3·a H < 3,5 m
Lamelar	a < L H < 0,5 m

¿Qué ocurre al incrementar el Caudal de tratamiento?

- Carga superficial: aumenta
- Tiempo de residencia hidráulico: disminuye
- Arrastre de partículas

TEMPERATURA Y DOSIS DE QUÍMICOS

Efecto de la temperatura

Una temperatura $< 4^{\circ}\text{C}$ tiene un impacto negativo sobre la sedimentación debido al incremento de densidad y viscosidad

$$v_t = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) g}{18\mu}$$

Seguimiento de las dosis de químicos

Se puede realizar un ensayo para evaluar si la dosis de coagulante – floculante es la correcta

Se realiza una sedimentación en una probeta con tiempo controlado

Ensayo de sedimentación

El volumen de sedimentador debe ser de un 70%

- Si el test $> 75\%$ sedimenta muy lento
- Si el test $< 65\%$ sedimenta muy rápido

Se debe analizar la dosis, tiempo de mezcla o cambio en la calidad de entrada

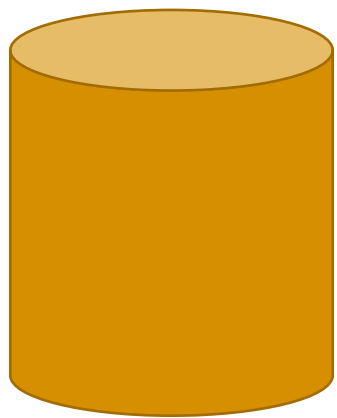
Para el análisis de la dosis emplear un Jar-test

FLOTACIÓN

Definición

Operación unitaria que consiste en la separación de partículas líquidas o sólidas de una fase líquida, basándose en la adsorción y desorción de un gas de forma continua.

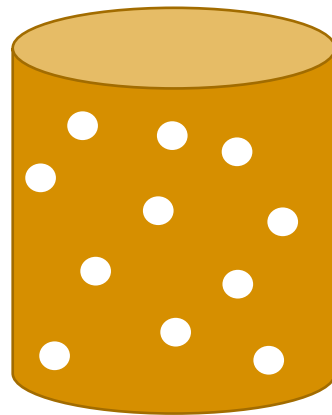
Es un proceso de separación gravitacional donde las partículas son atrapadas por burbujas de gas produciendo que la densidad aparente del agregado burbuja-partícula sea menor que la del agua.



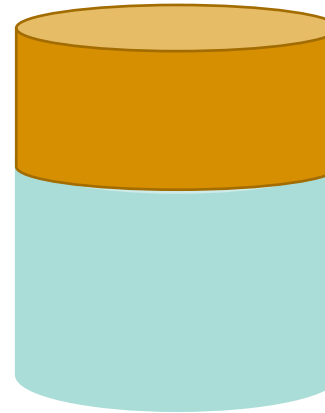
Suspensión



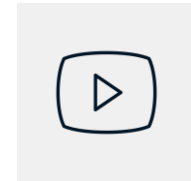
Se introduce burbujas finas de aire que se adhieren a las partículas disminuyendo su densidad relativa



Las partículas o el aceite presente en el agua ascienden alcanzando la separación por flotación



Acceso a video de funcionamiento



FLOTACIÓN

Objetivos

- Separación de aceite, grasas y fibras de baja densidad
- Separación de partículas

Tipos de procesos de flotación

Los procesos de flotación se clasifican atendiendo a los diferentes métodos de producir las burbujas de gas

FLOTACIÓN ELECTROESTÁTICA

- Las burbujas de gas se producen aplicando corriente continua a la disolución mediante la disociación de la molécula de agua
- No tiene aplicación en el tratamiento de agua potable, exceptuando para plantas muy pequeñas (<10-20m³/h)

FLOTACIÓN POR AIRE INDUCIDO

- Las burbujas se producen por la aireación de la suspensión
- Sistema empleado para la eliminación de partículas grandes minerales
- No es adecuada para el tratamiento de aguas potables debido a la alta turbulencia y formación de espumas

FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

- Las burbujas se producen por la reducción brusca de la presión de la suspensión cuando esta satura en aire
- Sistema ampliamente utilizado en las instalaciones de potabilización

SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)

Descripción General

- Sistema que permite sustituir a un proceso de sedimentación después de la unidad de coagulación-floculación
- El tamaño de los flóculos afecta considerablemente al rendimiento de la unidad DAF
- Se emplea para retirar flóculos de pequeño tamaño

Zona de Contacto

- Las partículas y flóculos se ponen en contacto con las partículas de aire
- Los flóculos y las burbujas se unen formando un agregado

Zona de Separación

- Las burbujas no unidas ascienden
- Los agregados partícula-burbuja ascienden
- Se forma una capa de flotantes que debe ser retirada como un lodo
- El efluente se obtiene por la parte inferior
- Parte del efluente debe ser recircularlo para la saturación con aire
 - Ratio de recirculación (R=10%)

$$R = \frac{Q_r}{Q}$$

Cámara de saturación

- Presión trabajo 400-600 kPa
- Las microburbujas formadas esta entre 10-100µm
- La cámara consumo un 5-10 % de lo empleado en la bomba de recirculación
- Se pueden emplear distintos sistemas: Columnas de relleno; Inyección del aire en la aspiración de la bomba; Sistema Ventury
- Objetivo: la mayor cantidad de aire en la corriente a presión para liberar el mayor número de burbujas



Filtración Granular

FILTRACIÓN

Definición

Proceso unitario de separación de sólidos desde una suspensión a través de un medio mecánico poroso, filtro que retiene los sólidos de tamaño mayor que su porosidad y permite el paso del líquido y partículas de menor tamaño de la porosidad

Principales sistemas en la eliminación de material en suspensión

- Filtración Granular
- Filtración con membranas
 - Ultrafiltración
 - Microfiltración

Principales sistemas en la eliminación de material disuelto (Tema 6)

- Ósmosis Inversa
- EDR

CONCEPTOS GENERALES DE LA FILTRACIÓN GRANULAR

Filtración granular dentro de la planta de potabilización

- Uso Directo para fuentes con baja contenido en turbidez y materia orgánica
- Aguas con contenido moderado/alto en materia orgánica, algas y turbidez requiere pretratamiento previo:

Coagulación/Floculación → Sedimentación/DAF → Filtración Granular

Filtración granular dentro de la planta de depuradora

- Tratamiento terciario para el afino de la eliminación de material suspendido después del secundario

Funcionamiento

- La filtración se hace sobre lechos de diversos materiales granulares
- El agua pasa por el lecho, bien por gravedad o bien por presión, quedando retenidos la mayor parte de los sólidos en suspensión.
- El lecho se ensucia progresivamente con la retención de sólidos
- El ensuciamiento se detecta por el incremento de la caída de presión de la unidad
- Requiere de lavados a contracorriente para mantener la operatividad

MEDIOS FILTRANTES

Tipos de medio

- Los más comunes son arenas silíceas y antracitas solos o en sistemas mixtos
- Normalmente se añaden capas de granate o minerales con estructuras de hierro-titanio
- Se puede emplear rellenos de carbón activo cuando se dese eliminar olores o adsorber alguna sustancia
- En los últimos años se han desarrollado materiales cerámicos para alcanzar determinadas granulometrías

Propiedades de los medios filtrantes

Tamaño de grano y distribución de tamaños

- Principal factor que determina la pérdida de carga y los requerimientos de lavado
- El tamaño del grano se debe realizar mediante métodos estándar
- El tamaño del grano se suele expresar en función de:
 - Tamaño efectivo (ES): representa el tamaño para el cual el 10% en masa de los granos son más pequeños. Definido como d_{10}
 - Coeficiente de uniformidad (UC): Relación entre la medida correspondiente al d_{60} y el d_{10}

MEDIOS FILTRANTES

Propiedades de los medios filtrantes

Densidad del grano

- Afecta al dimensionamiento del lavado
- Se define como la masa por unidad de volumen

Dureza del grano

- Afecta a la durabilidad del filtro
- Dureza mínima aceptable 2,7-3

Porosidad

- Afecta a la capacidad de eliminación de sólidos, pérdida de carga y al lavado
- Se define como la ratio entre el volumen de hueco por volumen de cama

Propiedades	Arena	Antracita	Granate
Granulometría (mm)	0,4-0,8	0,8-1,6	0,3-0,6
Coefficiente de uniformidad	≤1,5	≤1,5	≤1,5
Densidad (kg/m ³)	2.650	1.450 - 1.730	3.600 - 4.200
Porosidad	0,42 - 0,47	0,5 - 0,6	0,45 - 0,55
Esfericidad	0,7 - 0,8	0,46 - 0,60	0,60

MEDIOS FILTRANTES

Configuraciones

- Las configuraciones frecuentemente usadas son los sistemas convencionales de arena monocapa y los sistemas multimedio descendente
- Altura del lecho se puede establecer mediante el parámetro L/d_{10} (Rango de trabajo 1000-2000)

Sistema Monocapa

- Único material como lecho filtrante
- Se ha demostrado que las capas activas del filtro son los primeros centímetros de los sistemas monocapa

Sistema Multicapa

- Único material con diferente granulometría
- La velocidad de incremento de pérdida de carga es menor

Sistema multimedio descendente

- Los sistemas multimedio presentan una menor velocidad de pérdida de carga
- Permite ciclos de trabajo más largos
- La mejora de la calidad del producto no ha sido demostrada en los sistemas multicapa
- Permiten la retención de muchos más flóculos
- Existen diferentes combinaciones

MEDIOS FILTRANTES

Configuraciones

Sistema multimedio descendente

Configuración típica para una sola etapa de lavado



Antracita ○ Tamaño: 0,8-1,6 mm ○ Espesor: 500mm

Arena ○ Tamaño: 0,4-0,8 mm ○ Espesor: 400mm

Granate ○ Tamaño: 0,3-0,5 mm ○ Espesor: 150mm

Granate ○ Tamaño: 1,5-2,5 mm ○ Espesor: 100mm

Grava ○ Tamaño: 3,8-8,0 mm ○ Espesor: 100mm

Grava ○ Tamaño: 8,0-16,0 mm ○ Espesor: 100mm



Capa activa con tamaños decrecientes



Capa de separación entre activa y soporte



Capa soporte que aísla la zona activa de las boquillas del lavado

Para los lavados a contracorriente es necesario mantener una buena relación entre tamaños y densidades para mantener la estratificación

TEORÍAS Y MODELOS DE LA PÉRDIDA DE CARGA

En la industria consideramos la pérdida de carga a la pérdida de presión que se produce cuando el agua atraviesa una unidad.

En este caso la pérdida de carga se produce por dos mecanismos:

- La propia circulación del agua por el lecho filtrante (Pérdida de carga de lecho limpio)
- La deposición progresiva de sólidos en los poros de lecho. (Pérdida de carga durante un ciclo de trabajo)

Pérdida de carga de lecho limpio (h)

$$\frac{h}{L} = \frac{k\mu (1 - \varepsilon)^2}{\rho g \varepsilon^3} \left(\frac{a}{v}\right)^2 V$$
$$\left(\frac{a}{v}\right)_{esferas} = \frac{6}{d}$$
$$\left(\frac{a}{v}\right)_{irre} = \frac{6}{\Psi d}$$

La pérdida de carga producida por el paso del agua limpia por el lecho se determina por expresiones semi-empíricas y fenomenológicas como la **ecuación de Kozeny**

- h/L: es la pérdida de carga por longitud del lecho
- g: es la gravedad
- a/v: es la superficie específica (relación entre área y volumen de grano)
- μ : viscosidad del fluido
- Ψ : esfericidad
- ρ : densidad del fluido
- K: constante de Kozeny (se puede tomar como valor 5)

TEORÍAS Y MODELOS DE LA PÉRDIDA DE CARGA

Pérdida de carga durante un ciclo de trabajo($h_{(t,z)}$)

Durante el ciclo de trabajo los sólidos son depositados se depositan en los espacios de lecho, la porosidad se reduce y se produce un incremento de la pérdida de carga

$$h(t, z) = h_0 + fn[\sigma(t, z)]$$

- $h(t,z)$: es la pérdida de carga total
- h_0 : es la pérdida de carga sin ensuciamiento
- El segundo término hace referencia al ensuciamiento que depende de las características del tipo de ensuciamiento producido, es necesario ensayos de laboratorio con el fin de determinar la influencia de:
 - Tipo de agua
 - Dosis de coagulantes
 - Pretratamiento
 - Variables de operación

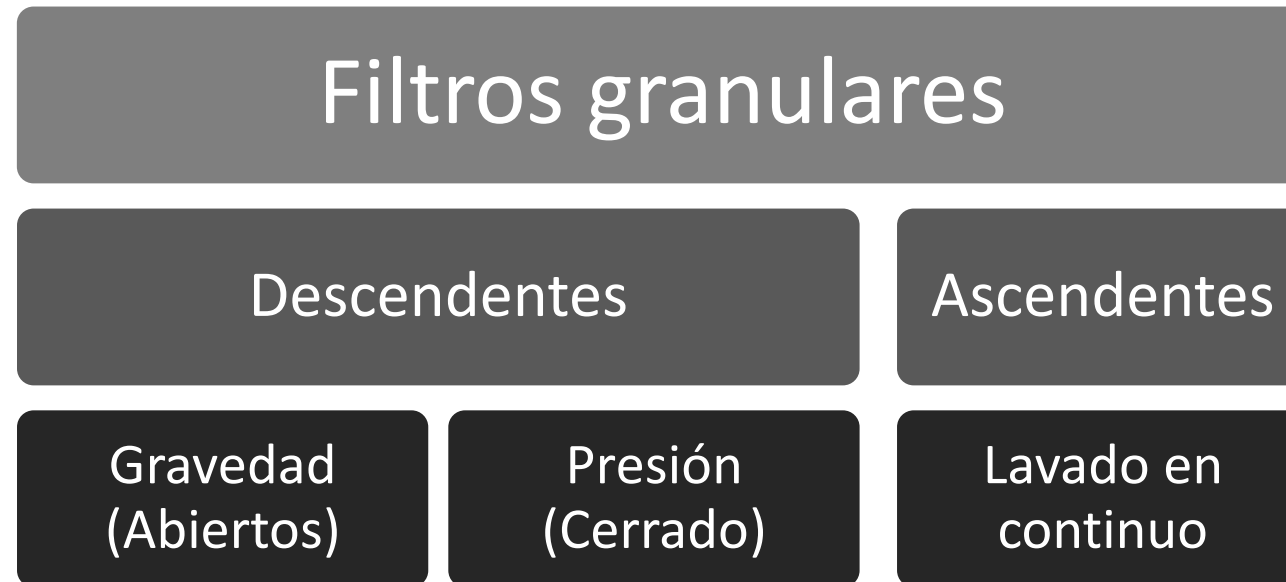
TIPOS DE FILTROS GRANULARES

Clasificación según el medio filtrante

- Monocapa: único material
- Multicapa: único material con diferente granulometría
- Multimedio: varios materiales

Clasificación según el sentido del flujo

Se focaliza la atención en la potabilización



FILTROS A PRESIÓN O CERRADOS

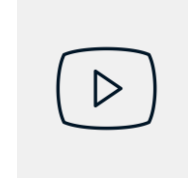
Funcionamiento

- Funcionan como los de gravedad, pero en depósitos cerrados
- El agua de alimentación se introduce a presión mediante bombas

Características

- Operan con mayores pérdidas de carga
- Trabajan con ciclos de producción más largos
- Velocidad de filtración: 6-25 m³/hm²
- Pueden ser horizontales o verticales
- Los diseños varían entre fabricantes
- Pueden trabajar
 - Caudal constante: el caudal se regula mediante una válvula
 - Caudal variable: la pérdida de carga regula el caudal que atraviesa el filtro

Acceso a video de funcionamiento



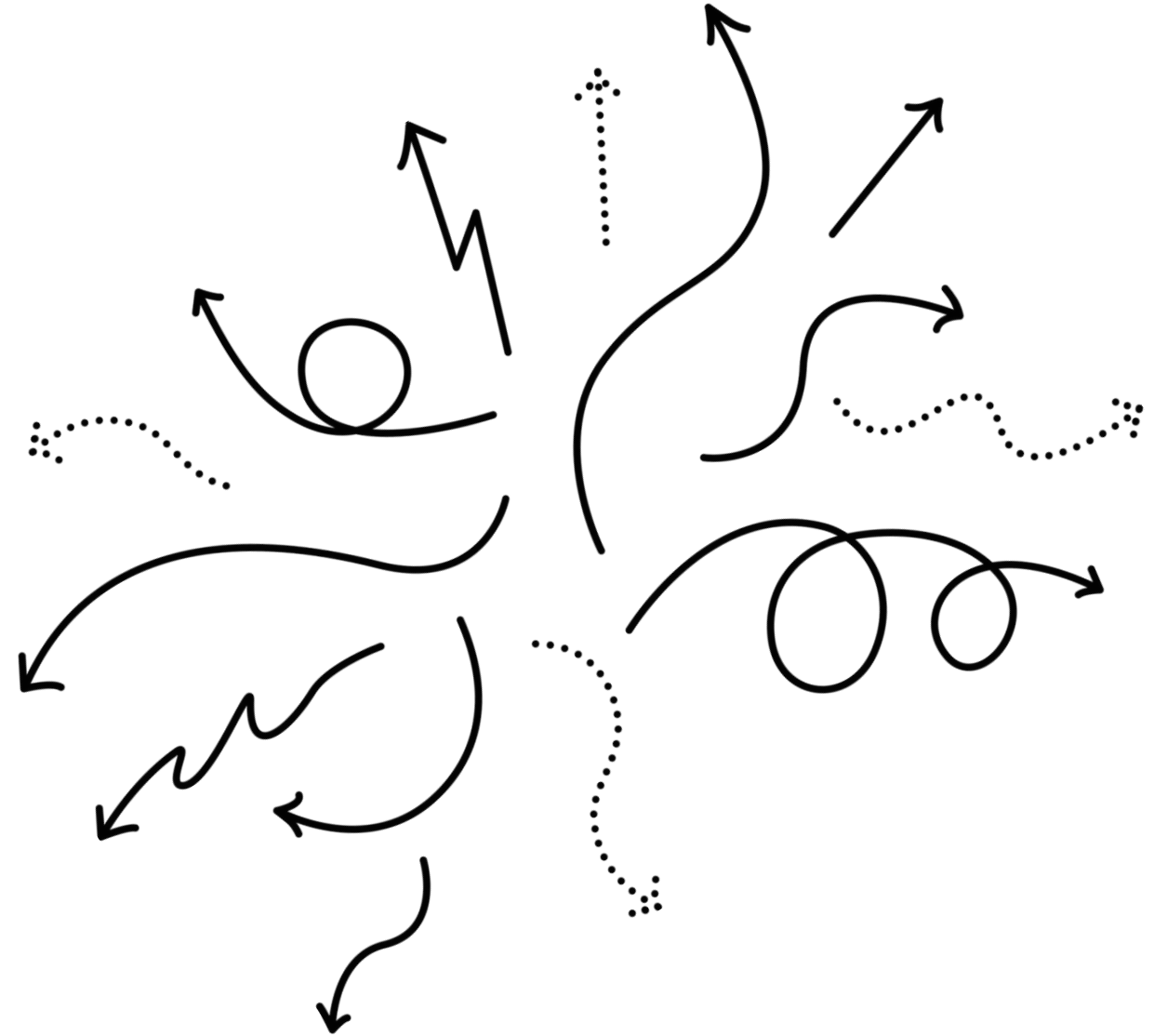
LAVADOS DE LOS FILTROS

Objetivos

- Es eliminar los sólidos o materiales retenidos
- Recuperar la pérdida de carga normal de la unidad
- Recuperar el caudal filtrado

Características

- El método más empleado es introducir agua desde la parte baja del filtro
- Se puede generar condiciones de fluidización con el objetivo de mejorar el efecto de limpieza
- Los lechos se expanden por tanto en el diseño hay que tener en cuenta este comportamiento (expansión 20-25%)

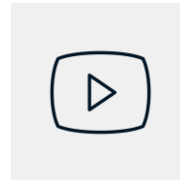


FILTROS DE LAVADO CONTINUO

Funcionamiento

- Estos sistemas funcionan de manera continuada ya que la arena se limpia automáticamente en el proceso de filtrado
- Existen dos flujos de movimiento:
 - Arena
 - Agua

Acceso a video de
funcionamiento





Filtración con Membranas

FILTRACIÓN CON MEMBRANAS

Filtración con membranas

- El uso de las membranas representa un papel importante en el proceso de potabilización del agua
- En los últimos años su crecimiento ha sido exponencial
- Permiten soluciones particulares a problemas concretos
- Las membranas se agrupan en módulos, estos en bastidores o trenes
- La filtración típica con membranas empleadas eliminación de material particulado o sustancias coloidales son la:
 - Microfiltración
 - Ultrafiltración

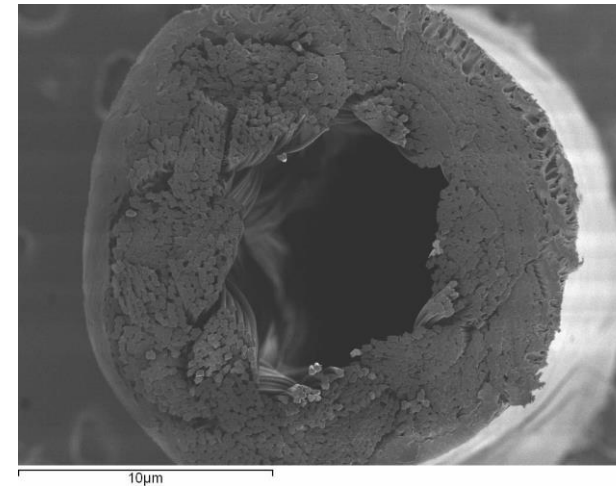
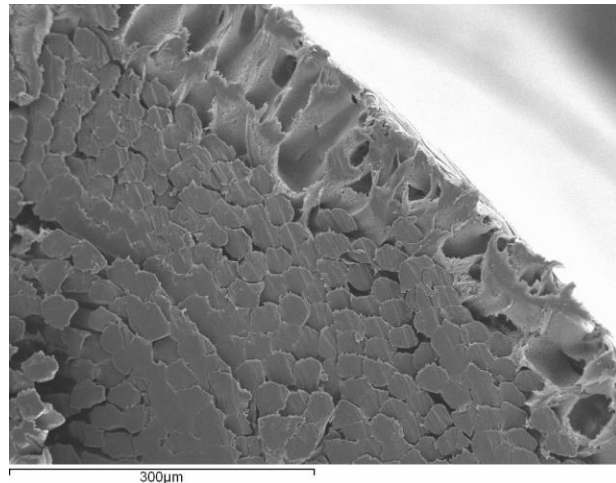
Ultrafiltración y microfiltración

- Todos los materiales mayores que su tamaño de poro
- Virus, bacterias, algas, protozoos, hongos
- Partículas
- Con la ayuda de procesos de coagulación floculación:
 - Materia orgánica
 - Contaminantes prioritarios
 - Color

MEMBRANAS DE MICRO Y ULTRAFILTRACIÓN

Características de las membranas

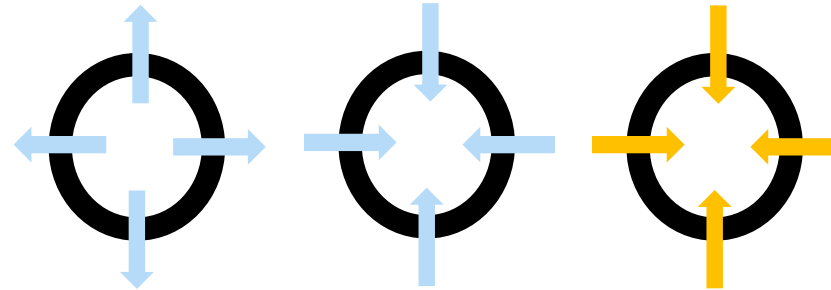
- Para el uso de agua potable la configuración más empleada es la de fibra hueca.
- Pueden ser de diferentes materiales en función del fabricante
- El diámetro interno de la fibra oscila entre 90-1.900 μm
- Tamaño de poro:
 - Microfiltración: $> 0,1 \mu\text{m}$
 - Ultrafiltración: $< 0,1 \mu\text{m}$
- El flujo de agua atraviesa la membrana que suele tener una estructura asimétrica



MEMBRANAS DE MICRO Y ULTRAFILTRACIÓN

Fuerza impulsora para la separación

- Se debe aplicar una presión que permite que el fluido atraviese la membrana reteniendo las impurezas
- Se puede realizar mediante tres formas:
 1. De dentro hacia fuera aplicando presión positiva sobre las membranas
 2. De fuera hacia dentro con presión positiva sobre las membranas
 3. De fuera hacia dentro aplicando vacío sobre las membranas



Módulos de membrana

- Para el tratamiento de agua potable suelen utilizarse:
 - Membranas introducidas en un tubo de presión
 - Membranas sumergidas en un tanque
- Cada fabricante posee diferentes características de módulos.
- Módulos empleados para la ultrafiltración de Veolia

Módulos comerciales



Transporte y separación de la materia

Ley de Darcy

La ley de Darcy describe la relación entre el flujo de filtrado obtenido en la membrana en función de la fuerza impulsora aplicada (presión)

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m}$$

- ΔP : es la caída de presión aplicada (Presión Transmembrana, TMP)
- μ : viscosidad del fluido
- R_m : es la resistencia hidráulica de la membrana limpia al paso de agua a través de ella
- En el caso de emplearse en soluciones con alta conductividad es necesario incorporar el efecto de la presión osmótica (Normalmente en los casos de potabilización, no es aplicable, exceptuando cuando se emplea como pretratamiento de la ósmosis)

Ensuciamiento de las membranas

- Durante el proceso de filtración, los materiales retenidos producen un ensuciamiento que genera un incremento de la resistencia hidráulica del proceso de filtración.
- Si se asume un modelo de resistencias en serie, la ley de Darcy se modifica

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f)}$$

- R : es la resistencia global del sistema
- R_m : es la resistencia hidráulica de la membrana limpia al paso de agua a través de ella

El ensuciamiento se estudiará afondo en el Tema 8