

Los sedimentadores lamelares en el tratamiento de aguas residuales

Antonio Gutiérrez Lavín
Julio L. Bueno de las Heras

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente
Universidad de Oviedo
ANQUE de Asturias

La sedimentación es un fenómeno natural que sustenta una de las operaciones básicas de más solera en ingeniería de procesos, cuyas aplicaciones más eficientes y económicas, y cuyos más estimulantes requerimientos, tienen lugar con frecuencia en el ámbito del tratamiento de efluentes residuales. A partir de la experiencia de los autores en el diseño y operación de sedimentadores analíticos, y separativos, este trabajo pretende contribuir a destacar los más relevantes aspectos teóricos en la modelización de una variante de esta operación, la sedimentación con superficies ampliadas, que responde a la necesidad de resolver un problema común en el diseño de cualquier operación separativa: la economía de espacio en el dimensionado de equipos.

1. ANTECEDENTES EN EL ESTUDIO Y PRÁCTICA DE LA SEDIMENTACIÓN

Alguien, en alguna parte, ha dejado escrito que la **sedimentación** es la cenicienta de las operaciones básicas. Hay razones que hacen de esta aseveración algo más que una frase tópica y algo pretenciosa.

La Cenicienta es el arquetipo de una funcionalidad discreta, eficiente, y noble, postergada a trajines humildes, pero siempre disponible para la oportunidad de demostrar sus posibilidades ante más dignos requerimientos. La sedimentación es una operación basada en unos principios aparentemente sencillos y supuestamente bien conocidos, ubicada en regiones del proceso donde suele llevar a cabo tareas escasamente sofisticadas, casi siempre viéndoselas con gangas, subproductos y residuos. Quizá más que otras operaciones de separación hidráulica, la sedimentación ha tenido un tratamiento metodológico comparativamente muy modesto, lo que ha contribuido a alimentar la convicción de que se trata de una operación muy empírica, cuyo diseño descansa más en principios heurísticos y en generosos sobredimensionados que en formulaciones rigurosas y fiables.

Además, trabajar en el ámbito de las separaciones gravitacionales -salvo que se haga con materiales muy valiosos- no parece ser un terreno muy propicio para conseguir una patente afortunada, o el reconocimiento cuantitativo de una modelización de impacto. Así lo atestiguan, por ejemplo, el reducido grupo de investigadores que trabaja en este campo en el ámbito público y privado dentro de nuestro propio país, de las que destacan las aportaciones teóricas de R. Font en la Universidad de Alicante, y el exiguo volumen de aportaciones que sedimentan año tras año en los estratos de la bibliografía científica más relevante. Por este motivo, la

mayor parte de los textos disponibles en este área son obras relativamente anticuadas y, con frecuencia, las aportaciones de muchos artículos se enmascaran con procedimientos y nomenclatura sui generis. Todo ello ha contribuido a relegar inconscientemente durante décadas a la sedimentación en un capítulo de la tecnología que P. Le Goff, desde el ENSIC de Nancy, ha denominado con sorna *Roustitic Chemical Enginnering Operations*.

Sin embargo, el estudio de la sedimentación ha experimentado un sensible incremento en los últimos años como consecuencia de la sensibilización por los temas medioambientales y de sucesivos impulsos laterales, uno debido al auge de las tecnologías de **depuración de efluentes residuales** a principios de la década de los setenta y otro, más reciente, en un momento de resurrección de tecnologías clásicas, reexploradas gracias al recurso de nuevas técnicas instrumentales y a la disponibilidad de versátiles medios de cálculo, simulación y control. La sedimentación se presenta ahora como una operación susceptible de una rigurosa modelización analógica con respecto a otras operaciones de transporte, lo que representa los cimientos para un adecuado control de operación **(29, 36)**. La sedimentación sigue siendo, además, un procedimiento muy eficaz de separación, que requiere tecnología asequible y exige escaso mantenimiento, aunque sí sea dependiente de suficiente disponibilidad de **espacio en planta** cuando se trata de procesar los elevados caudales que suelen circular en las regiones del proceso donde esta operación encuentra su más frecuente utilidad. Sobre este aspecto particular de la sedimentación, la economía de espacio, se pretende incidir a continuación.

2. FUNDAMENTOS DE LA SEDIMENTACIÓN

2.1. La sedimentación como operación básica

La *Sedimentación* es una **operación unitaria**, inscribible en el ámbito de los procesos físicos, basada en el **fenómeno** de *desplazamiento relativo* de fases particuladas en el seno de un medio fluido, en la cual se haya implicado un **mecanismo** de *transferencia de cantidad de movimiento* por flujo viscoso.

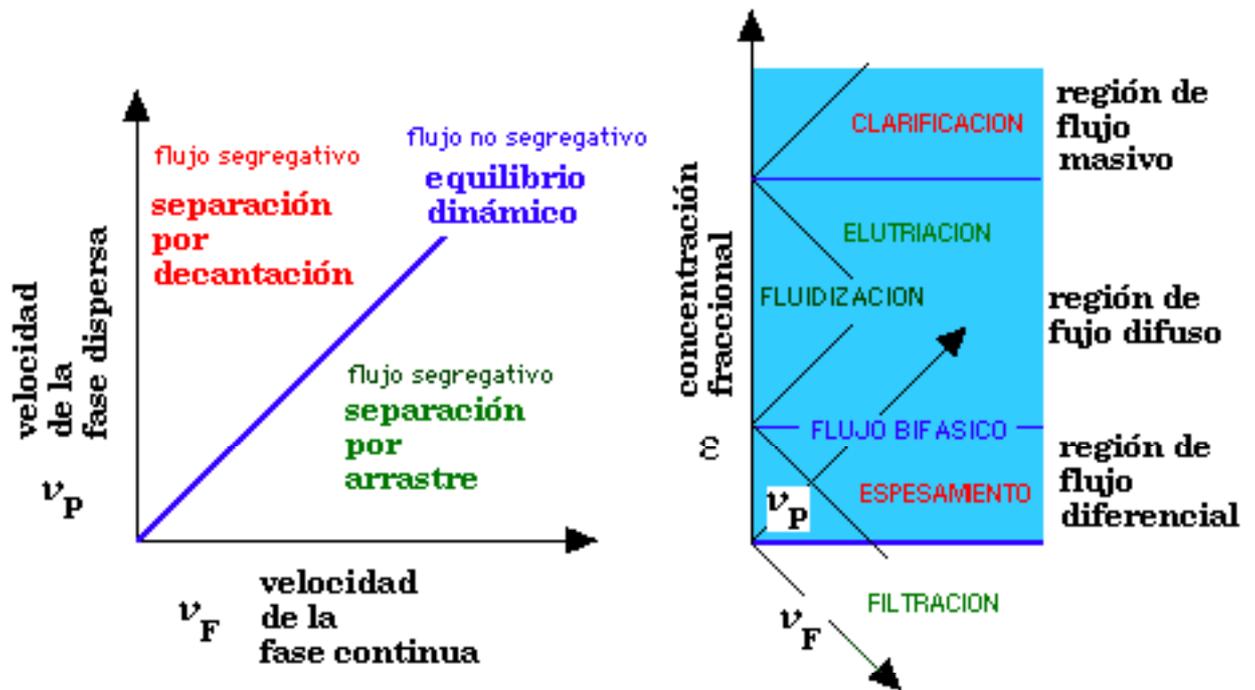


Fig.1. Los mecanismos de sedimentación característicos de las distintas variantes de esta operación dependen del campo de velocidades y de las proporciones relativas entre las fases presentes

El comportamiento de partículas sedimentando es tan susceptible a las interacciones intercorpúsculares que el comportamiento y **modelización** de la sedimentación de suspensiones de alta porosidad (diluidas) es muy diferente del comportamiento de suspensiones de porosidad media (lodos) y se rige, a su vez, por mecanismos muy distintos de los que se hallan presentes en la sedimentación de suspensiones de muy baja porosidad (pastas), lo que podría justificar el pensar que, de hecho, se trata de **operaciones diferentes: sedimentación individualizada, espesamiento y compactación (Fig.1.)**(3). Por otra parte, el **objetivo** de la operación de sedimentación en el contexto de un proceso industrial o de laboratorio puede ser diverso, y abunda en esta diferenciación de técnicas o suboperaciones de sedimentación. En primer lugar se puede pretender una eliminación de un material denso de su suspensión, siendo éste generalmente de escaso valor (un contaminante o una *ganga metalúrgica*), en cuyo caso el objetivo es eliminar la fase fraccionada, recuperando un disolvente lo más puro posible: se trata de una **clarificación**. Puede suceder, por el contrario, que el material en suspensión sea más valioso que el disolvente (una mena metalúrgica, por ejemplo) y que interese su recuperación acompañado de la menor cantidad posible de disolvente: se trataría de una **concentración (11,12,13)**. Lógicamente pueden perseguirse ambos objetivos simultáneamente (por ejemplo, si se trata de recuperar la fase particulada y recircular el fluido) aunque en los tres casos prevalece una finalidad de **separación**. Sin embargo la separación diferenciada de partículas en función de sus características intrínsecas (naturaleza y morfología) introduce una nueva posibilidad, la **separación diferencial**, de enorme interés tanto en el **fraccionamiento** de

muestras complejas - **elutriación, cromatografía hidráulica**- como en el **análisis granulométrico**.

Gran parte de las suspensiones son inestables y dan lugar a separaciones espontáneas de elevada eficacia en intervalos de tiempo suficientemente reducidos, según criterios experimentales, como para permitir que el mecanismo de sedimentación gravitacional sin **coadyudantes** sea el fundamento de una técnica separativa, que podría clasificarse indistintamente como **sedimentación primaria o espontánea**. Por el contrario, en aquellas suspensiones en que, por su mayor estabilidad, la cinética del proceso sea comparativamente muy lenta y haya de recurrirse a procedimientos auxiliares de tipo físico, químico o biológico, se tiene la **sedimentación inducida, coadyuvada o secundaria (6,10,23)**.

2.2. Mecanismos de sedimentación

2.2.1. Manifestación macroscópica

La sedimentación no es más que la resolución espontánea de una situación de inequilibrio motivada por la competencia de dos medios de distinta susceptibilidad (generalmente densidad) a ocupar un mismo espacio en un campo de fuerzas (generalmente gravitatorio). Si bien el equilibrio absoluto se alcanza cuando ambos materiales se separan físicamente de forma definitiva (segregación en los límites del sistema, por ejemplo sólidos en el fondo de una vasija), pueden alcanzarse situaciones de pseudoequilibrio, **equilibrio dinámico** como consecuencia de la compensación de las fuerzas impulsoras con las fuerzas emergentes (por ejemplo, la velocidad límite o terminal de sedimentación es el resultado del equilibrio de la fuerza de gravedad con las fuerzas de rozamiento y los empujes dinámicos netos).

La sedimentación es pues un **fenómeno macroscópico**. Quiere esto decir que en el **nivel de descripción** suficiente para el análisis o interpretación de este fenómeno, la materia se percibe como un medio continuo, tanto la fase continua - fluida- como la fase dispersa, generalmente sólida o, al menos, indeformable y rígida en las condiciones de estudio. Por ello, la sedimentación de gotas o la flotación de burbujas puede estudiarse análogamente al desplazamiento de partículas sólidas, siempre que no se manifiesten deformaciones o fenómenos de flujo intraparticular, en cuyo caso el tratamiento debería plantearse como un modo de flujo multifásico, necesariamente describible a nivel microscópico dada la importancia de la distribución relativa de velocidades en un análisis riguroso.

Como se indica en la Fig.2, en el caso particular de la sedimentación gravitacional, el término cinético - interpretable como una **constante de velocidad** o como un coeficiente de transporte - es una función de la **fuerza impulsora** g , de la **susceptibilidad específica**, tamaño D , forma ψ y densidad ρ , así como de descriptores del **mecanismo de transporte** viscoso, fracción de huecos, ϵ , y modelo reológico, μ, σ (36) .

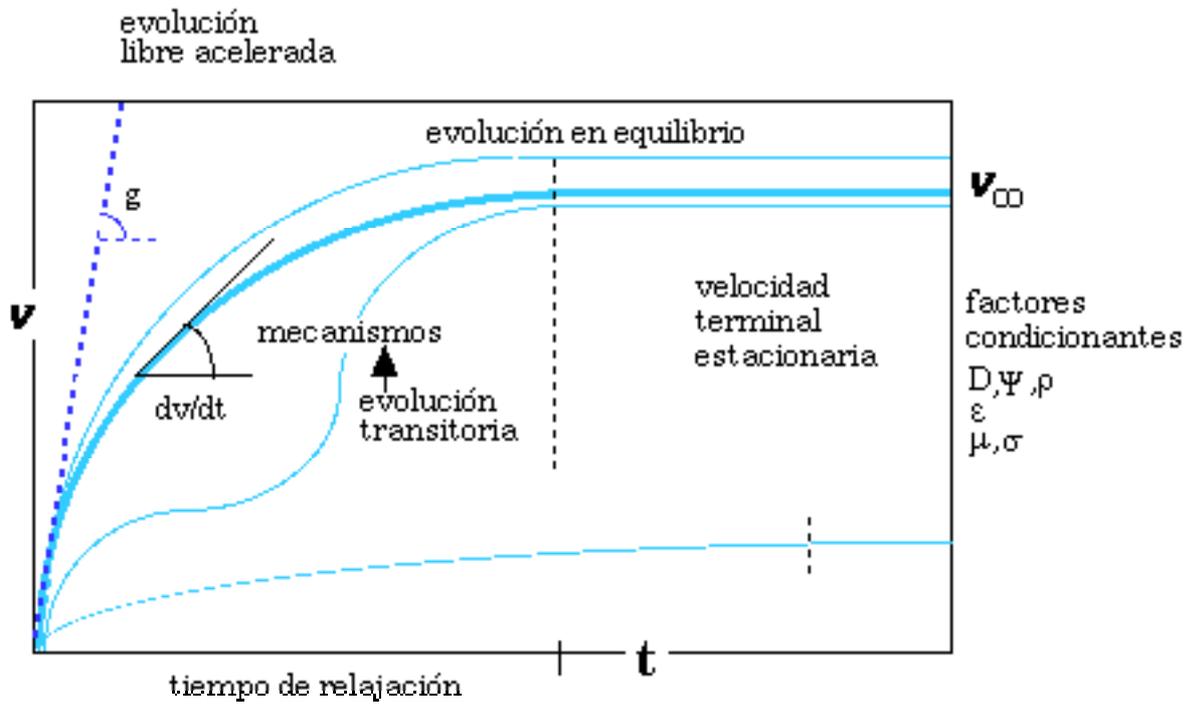


Fig.2. Representación generalizada de la manifestación macroscópica de fenómenos cinéticos aplicada al caso particular de la sedimentación gravitacional.

2.2.2. Mecanismos de sedimentación

Extendiendo la analogía entre los fenómenos de transporte, el cálculo de la transferencia de interfase -en este caso el de energía mecánica- puede hacerse por cálculo riguroso a partir de la manipulación matemática de formas simplificadas (con los mínimos términos precisos para evitar enmascaramientos o cálculos complejos) del **balance** microscópico diferencial **de energía mecánica** (ecuación de variación), que en su forma macroscópica general adopta la conocida expresión:

$$\Delta \left(\underbrace{U}_{\text{Energía interna}} + \underbrace{PV}_{\text{Energía de entidad}} + \underbrace{E_{\sigma}}_{\text{Energía de interfase}} + \underbrace{E_c}_{\text{Energía cinética}} + \underbrace{E_p}_{\text{Energía potencial}} \right) + \underbrace{E_{vin}}_{\text{Transporte}} - \underbrace{E_{vex}}_{\text{de interfase}} = \underbrace{dE_{total}}_{\text{contenido integral}} / dt$$

convección y acarreamiento
intercambio
variación interna

con términos, todos ellos, cuyas formas prácticas suelen utilizarse con las dimensiones:

- $(ML^2t^{-2}) = \text{Energía}$
- $(ML^2t^{-2}) / t = ML^2t^{-3}$; *Flujo de energía = Potencia*
- $(ML^2t^{-2}) / L^3 = ML^{-1}t^{-2}$; *Concentración de energía = Densidad de flujo de cantidad de movimiento*
- (MLt^{-2}) ; *Fuerza = Flujo de cantidad de movimiento*
- $(ML^2t^{-2}) / (t)(Mt^{-1}) = L^2t^{-2}$; *Potencia / flujo másico*

$(ML^2t^{-2}) / (t)(MLt^{-1}) = Lt^{-2}$; *Potencia / cantidad de movimiento; Flujo de energía / cantidad de movimiento*

$(ML^2t^{-2}) / (t)(MLt^{-3}) = L$; *Potencia/ flujo de fuerza*

Los términos imprescindibles para el cálculo teórico o para la estimación experimental suelen ser pues, además del correspondiente al **transporte de interfase** - impulsos y rozamientos- por el mecanismo viscoelástico correspondiente a la naturaleza reológica del sistema, E_V , el término de variación interna de contenido energético del sistema, dE_{total} / dt - que cuando se opera en régimen estacionario es nulo-, y los términos que describen el flujo neto de propiedad a través de los límites del sistema - generalmente presiones hidraulicas diferenciales o **velocidades terminales** (Fig.2), que suelen utilizarse como indicadores experimentales de los cambios que tienen lugar.

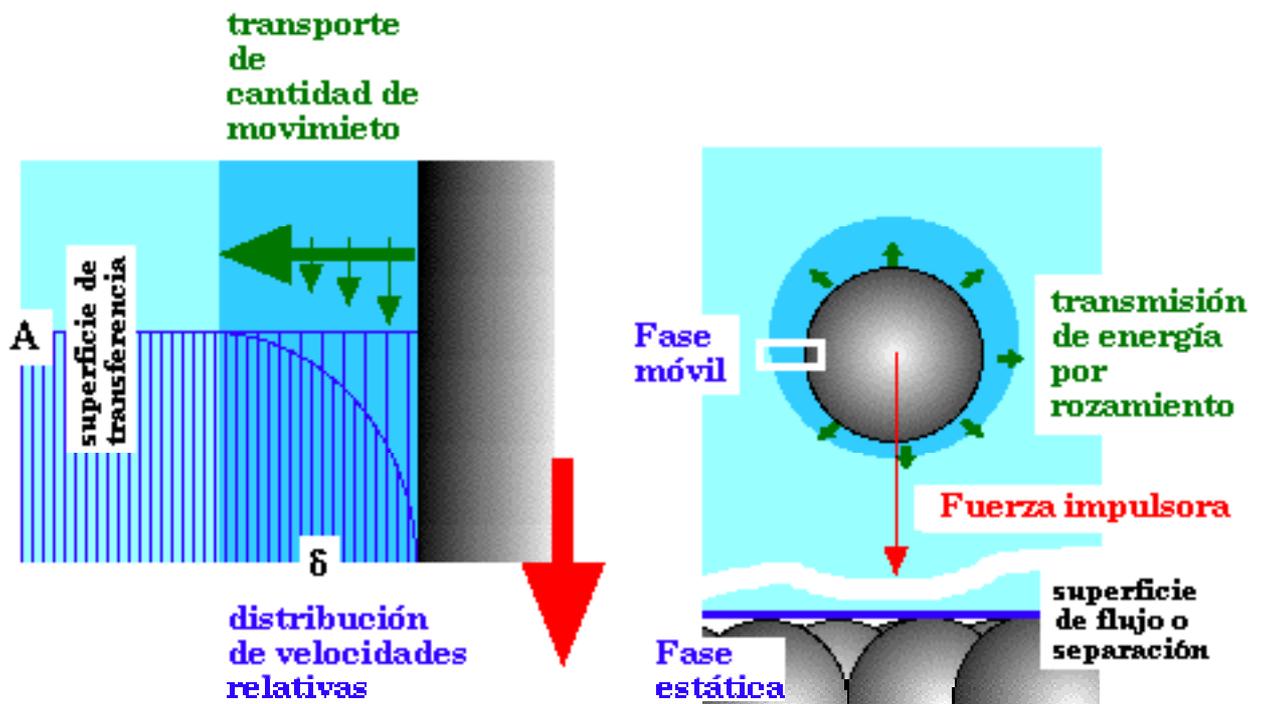


Fig. 3. Elementos para la descripción del fenómeno molecular de transporte de energía y del fenómeno macroscópico de desplazamiento de materia en sedimentación

Cuando el cálculo teórico de E_V no es abordable a nivel de **gradiente múltiple** debido a la complejidad geométrica o hidrodinámica se recurre a formas aproximadas, generalmente a nivel de **gradiente máximo**, (Fig.3), definiendo la **densidad de flujo de propiedad**, P , a través de dicha interfase mediante la introducción de **coeficientes de transporte**, k , basados a su vez en una **superficie de transferencia**, A , y en un potencial de concentración de propiedad, $\Delta(P/V)$, ambos reales o convencionales, en la forma típica del llamado **esfuerzo de zizalladura**, τ :

$$E_V = P/At = \Delta(S) = k \cdot \Delta(P/V) = \tau$$

La propiedad en tránsito, P , puede verse indistintamente bajo las formas de energía cinética o de cantidad de movimiento. Si se opta por esta última opción, S resulta ser la **concentración de cantidad de movimiento**, es decir, la **densidad de flujo hidrodinámico de materia**, y las dimensiones de k se corresponden con la forma más sencilla de un **coeficiente de transporte**

Aparentemente, y como es sabido, en el estudio práctico de la sedimentación se ha seguido otro camino formal, ya que la definición introductoria del **factor de fricción**, f , se hace como el cociente entre la **fuerza impulsora característica** F_k y una **energía cinética específica** E_k , si bien en una forma coherente con la forma analógica antes mencionada. Los resultados experimentales han nutrido correlaciones prácticas de este coeficiente para geometrías típicas, como función del número de Reynolds y de otros parámetros que contemplan peculiaridades morfológicas de los sistemas particulados.

2.3. Modos de sedimentación

2.3.1. Sedimentación y nivel de descripción

Si la **sedimentación** es un caso particular del **flujo relativo de cuerpos sumergidos**, éste es, a su vez, un caso particular del **flujo multifásico con transporte viscoso**. Aunque es bien sabido para los amables lectores que recuerdan o están acotumbrados a estos formalismos, cabe reiterar que la sedimentación es una operación basada en el **transporte molecular de energía mecánica** entre fases con distinta movilidad, y que el desplazamiento macroscópico - que no molecular- de materia de una región a otra es una consecuencia de este fenómeno substancial y primario.

En el mismo **nivel de descripción**, la fenomenología de la sedimentación está íntimamente relacionada con la de las demás operaciones basadas en la actuación simultánea o dominante de fuerzas, como es el caso de la **centrifugación** o de la **impactación** - también en el campo mecánico- o la **electromigración** en presencia de campos electromagnéticos. En un nivel de descripción más profundo (partículas de tamaño coloidal e inferior), las fuerzas mecánicas son del orden de magnitud, o inferiores, a las fuerzas electromagnéticas que condicionan las interacciones moleculares, por lo que los modelos que describen la movilidad de partículas enlazan los meramente hidrodinámicos con los **difusionales**, pasando por los modelos que describen los fenómenos **foréticos (6)**.

2.3.2. Sedimentación y grado de dispersión

Si bien son las dos coordenadas introducidas en la Fig.1 - las condiciones de flujo y la concentración- las principales determinantes de la fenomenología de la sedimentación, la importancia de la concentración es más perceptible en el desarrollo de modelos, puesto que el concepto de **flujo relativo** permite unificar, por simetría fenomenológica, el tratamiento de situaciones tan diferentes en la práctica como el arrastre, la fluidización o la propia sedimentación, así como el espesamiento y el flujo a través de lechos porosos.

Caida libre o sedimentación individualizada: Las partículas sedimentan dependiendo de una fuerza uniforme impulsora, cual es su peso excluido el empuje ascensional por flotación, equilibrada con la resultante activa de fuerzas de rozamiento de superficie y forma que dependen del movimiento relativo respecto del fluido. Este modo de sedimentación, descrito en sus elementos básicos en la Fig. 3, se da en los clarificadores de cabecera, como es el caso de los **desarenadores** en el tratamiento de aguas.

Sedimentación coalescente o difusa: Las partículas interfieren entre ellas, y la velocidad de sedimentación depende de varios factores más (grado de agregación, concentración, tamaños y características superficiales de las partículas). Este modo se da en la **sedimentación primaria**.

Sedimentación masiva o impedida, de flujo de piston: Las partículas interaccionan entre ellas de tal forma que sus posiciones se mantienen prácticamente fijas, unas con respecto a las otras, sedimentando el conjunto en forma de enjambre, con una velocidad global que algunos modelos suponen idéntica para todas las partículas. Este modo, descrito en sus elementos básicos en la Fig.5, se da en los **sedimentadores secundarios**.

Sedimentación en compresión o espesamiento: La interacción entre las partículas es total, las partículas no sólo son soportadas de forma hidráulica, sino que en parte son soportadas por otras partículas, por lo que se producen reducciones de volumen debidas a la evacuación del fluido ocluido. Este modo se da en la fase de sediemnto de los **espesadores**.

a. Sedimentación individualizada

La sedimentación de suspensiones diluídas se lleva a cabo por el mecanismo de **sedimentación individualizada**. Se utiliza este concepto para describir el tipo de sedimentación en el que el comportamiento de cada partícula no condiciona el de otras - el caso límite es el modelo de **partícula aislada** -, y en el seno de medios fluidos de extensión suficiente como para que la presencia de los límites del sistema -las paredes del recinto- puedan ser ingnoradas en sus efectos perturbadores. En estas condiciones -típicas de la **analítica granulométrica**- cada elemento de la fase particulada se comporta como un ente dinámico independiente. El cálculo teórico riguroso pueden acometerse en situaciones relativamente sencillas, generalmente si se pueden formular matemáticamente las líneas de flujo, el área y la orientación local de la superficie de contacto, y si se dispone además de un **modelo reológico** satisfactorio. Tal es el caso de partículas esféricas o de las morfologías típicas de los móviles de interés en aero o hidrodinámica.

Como es bien sabido, en el caso sencillo de esferas sedimentando en régimen laminar el cálculo teórico del transporte de interfase a partir de la ecuación de variación antes mencionadas permite deducir para la fuerza cinética la expresión

$$F_k = 6\rho\mu v$$

sea cual sea la velocidad de sedimentación, v , por lo que, según los convenios de definición y correlación de factores de fricción

$$f = 12/Re, 24/Re, \text{ etc.}$$

Si F_k se puede establecer externamente, por ejemplo impulsando la partícula (proyectil o móvil) o el fluido, la velocidad podrá calcularse a partir de esta expresión o de una homóloga en otras condiciones de flujo, y si es la velocidad la magnitud que puede medirse, F_k podrá inferirse por un sencillo cálculo a partir de estas formulaciones. En el caso particular de sedimentación - en el que F_k pueda establecerse de acuerdo con la ley de Arquímedes- vadopta el valor bien conocido como **ley de Stokes**. Para partículas de otra morfología, o para conjuntos de partículas, las formas teóricas se van haciendo más complejas, y terminan por ser inabordables, cediendo el paso a correlaciones de tipo empírico (*Steinour, Hawksley* etc...), que conducen, finalmente, a expresiones del tipo de *Coe y Clevenger*, que se analizan a continuación **(14, 18,28)**.

Tal y como se indica en el ejemplo de la Fig.4, la **densidad de flujo de sólidos**, S , que se produce por sedimentación individualizada, puede estimarse teóricamente como la resultante de aplicar el modelo hidrodinámico de sedimentación individualizada cada una de las fracciones discretas o continuas de tamaños de partícula que conforman al espectro de distribución granulométrica de la suspensión suministrado previamente por la correspondiente técnica analítica. Como se indicará más adelante, el concepto de densidad de flujo de sólidos se utiliza más en el caso de sedimentación masiva que en el de sedimentación individualizada.

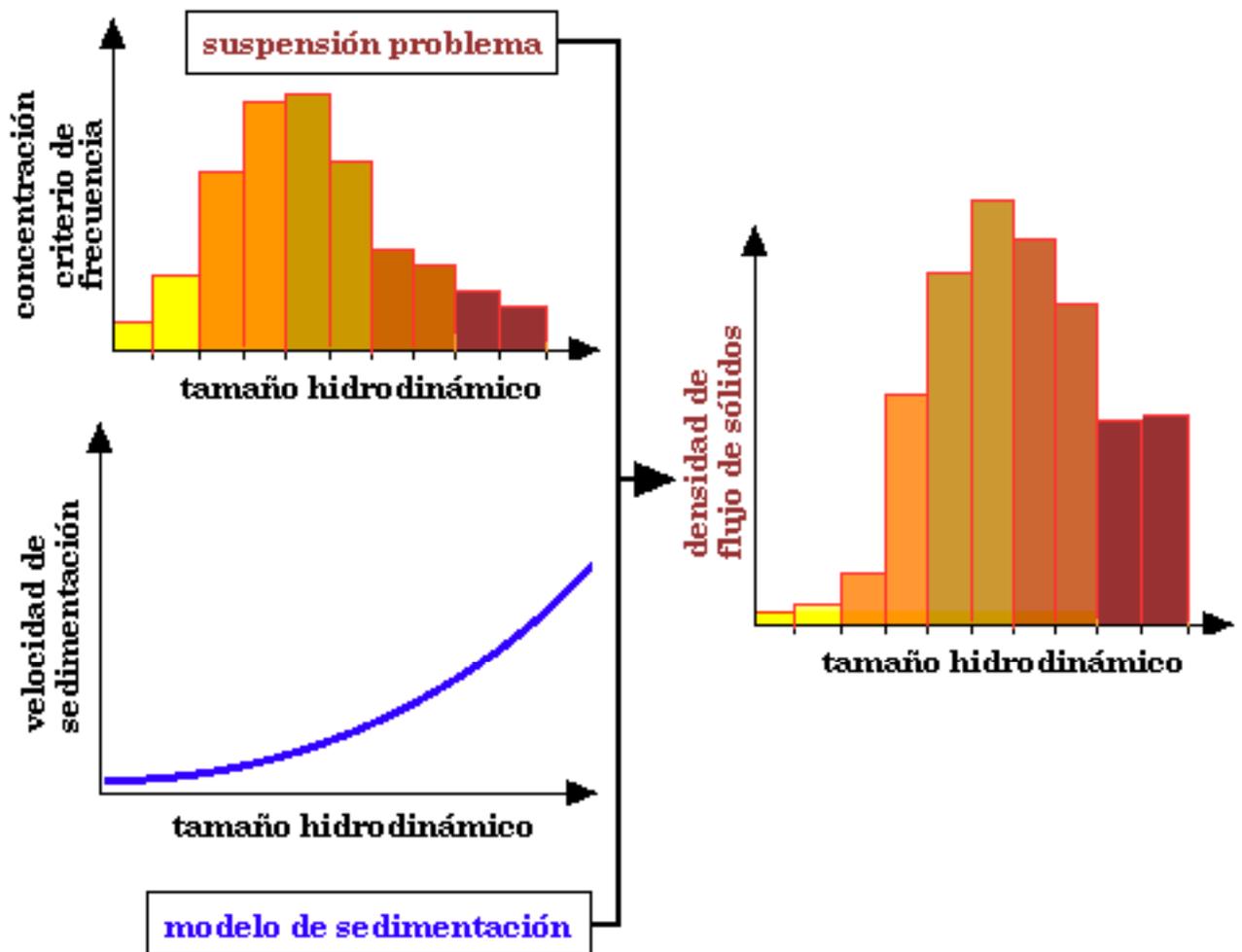


Fig.4. Distribución de la densidad de flujo de sólidos para una suspensión de granulometría y comportamiento reológico conocidos en condiciones de flujo individualizado y/o difuso.

Una suspensión diluída es un macrofluido que se comporta como una mezcla multicomponente, en la que cada fracción tiene un comportamiento diferenciado, es decir, su propio coeficiente cinético. Sin embargo, y salvo en condiciones de operación poco usuales en condiciones prácticas, el equilibrio estático en una suspensión no conduce a una situación de interés separativo diferencial, por lo que los sedimentadores clasificadores o fraccionadores han de operarse con los mismos criterios de un separador de velocidad difusional, programando los cortes en el momento oportuno para aislar las distintas fracciones. De hecho la cromatografía GL y LL, tanto en columna llena como vacía, encuentran su homóloga macroscópica en la **cromatografía hidrodinámica**, en la que los mecanismos de retención selectiva conciernen a la permeabilidad del relleno y en la que la dispersión se produce por arrastre o sedimentación diferencial .

b. Sedimentación masiva

Cuando las interacciones interparticulares son muy fuertes -**sedimentación perturbada, impedida o masiva**- la experiencia sugiere acometer el problema

desde otra perspectiva, como es partir de un modelo límite, tan simple y atractivo como poco viable - la llamada teoría de *Coe y Clevenger* reformulada por *Kynch*- y acometer luego la interpretación de sus muchas desviaciones (1,2).

A diferencia de lo que sucede con la sedimentación individualizada, cuyo tratamiento analógico la emparenta con los sistemas termodinámicos multicomponentes - a cada clase de partículas le corresponde una cinética de migración- la sedimentación masiva permite una formulación más simplificada. En efecto, al igual que la transformación química y la transferencia molecular, la densidad de flujo de sólidos por sedimentación descrita por la teoría de Kynch se puede modelizar siguiendo formas más o menos complejas de la expresión cinética convencional

$$S = k_s \cdot f_s(c_p)^n$$

también llamada **función de estado** o **curva característica** de la suspensión, muchas de cuyas posibles formas han sido analizadas previamente por nuestro grupo de trabajo, que, para no ser menos, también ha propuesto alguna variante de similar fortuna (19,23).

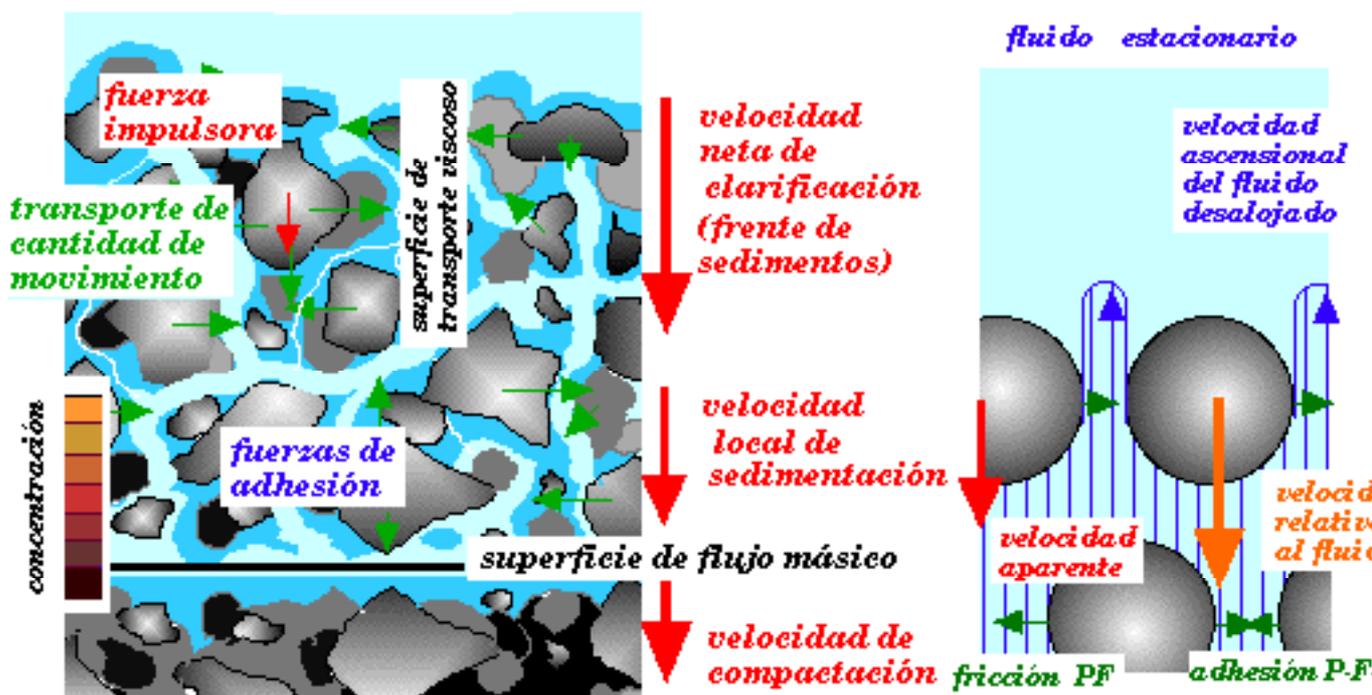


Fig.5. Distribución de la densidad de flujo de sólidos para una suspensión masiva de características granulométricas y reológicas conocidas.

El **coeficiente cinético macroscópico** k_s es una función de la velocidad máxima de sedimentación a dilución infinita en recintos confinados, y se puede manipular formalmente para que tenga el sentido y dimensiones propias de un coeficiente de transporte de masa, que son en cierta forma inversas a las correspondientes a un coeficiente cinético microscópico de transporte de cantidad de movimiento (como algunas formas del factor de fricción), puesto que buena

conductividad de momento significa alto coeficiente de rozamiento, gran transferencia de energía potencial - es decir, facilidad para el agotamiento del manantial - y disminución de la energía cinética del cuerpo que cae, y, consiguientemente, baja velocidad de transporte macroscópico.

La *función del estado* de la suspensión implica exponentes de la concentración del orden de los previstos por Richardson y Zaki, $n \geq 1$, como sucede en transferencia de materia, mientras que en reactividad química $n \geq 0$.

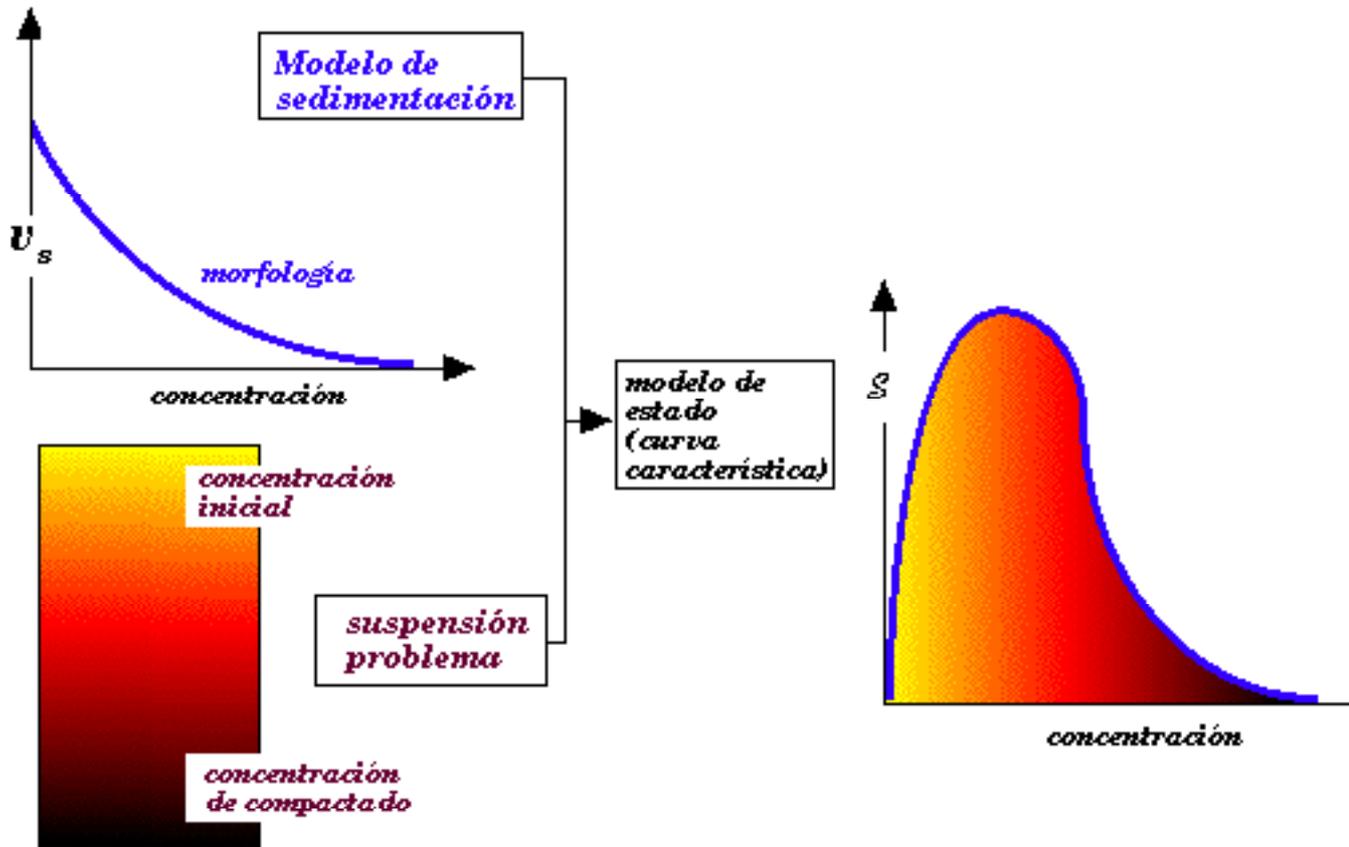


Fig.6. Distribución de la densidad de flujo de sólidos para una suspensión de granulometría y comportamiento reológico conocidos en condiciones de sedimentación masiva

Esta densidad de flujo de sólidos, S , permite una doble interpretación: En función de sus dimensiones

$$ML^{-1}t^{-1} = (L^{-1}) (L^{-3}) = (M)(L^{-2})(t^{-1})$$

puede interpretarse como una concentración de cantidad de movimiento en la fase sedimentante, lo que permite asimilar el diagrama $S(c_p)$ (Figura 6) a un diagrama de equilibrio entre la concentración de partículas de una suspensión en coordenadas de Lagrange y la **concentración de cantidad de movimiento** en el seno de la misma suspensión en coordenadas de Euler; y como una **densidad de flujo de masa por sedimentación**, lo que permite asimilar el mencionado diagrama a un escenario

$$f \text{ (densidad de flujo de propiedad)} = F \text{ (concentración de propiedad en tránsito)}$$

Si se compara la curva $S(c_p)$ con la curva correspondiente a una cinética homogénea autocatalítica la semejanza puede forzarse un poco más en la región central de la curva de estado, en torno a la inflexión que se justifica por el progresivo incremento del peso relativo del término que contempla el decrecimiento de la velocidad al aumentar la concentración.

2.4. Diseño de sedimentadores

El diseño de un sedimentador, como el de cualquier otra operación básica de separación, consiste en establecer una relación entre los cambios esperados o impuestos a un sistema problema y los requerimientos de **tiempo** a transcurrir y/o el **tamaño útil del recinto** preciso para llevar a cabo tal transferencia. Aunque el tratamiento que recibe en la bibliografía el diseño de sedimentadores es aparentemente atípico en comparación con los formalismos de diseño utilizados en otro tipo de operaciones básicas de transporte o transformación, las analogías entre el diseño de este tipo de separadores y el de otras operaciones unitarias es evidente (7,8,9).



Fig.7. Diagramas de flujo de información de una unidad de proceso: a. Forma general; b. Configuración para un sedimentador separativo; c. Configuración para un sedimentador analítico (36).

Si se trata de un **separador analítico**, la clave será relacionar biunívocamente la cinemática observable - velocidad o desplazamiento- con los descriptores de susceptibilidad - masa, forma, rugosidad y tamaño de la fase particulada- . Si se trata

de un **separador de proceso**, el objetivo es vincular la cantidad de materia desplazable a la disponibilidad de espacio para que este desplazamiento separativo tenga lugar (Fig.7).

2.4.1. Sedimentadores analíticos

Los principales sedimentadores analíticos son de dos tipos, en correspondencia con los mecanismos observados: Los **granulómetros** y los **sedimentómetros**. Los primeros constituyen uno de los más relevantes grupos de analizadores de **tamaño de partículas**, y aún siguen siendo hoy día insustituibles referentes de calibrado para otras técnicas. De hecho, y habida cuenta de que tamaño y forma son conceptos polisémicos, no exentos de ambigüedad, las técnicas de análisis han de seleccionarse de forma que el tipo de **tamaño** suministrado por la técnica elegida sea el más adecuado a la fenomenología que se tenga entre manos. No es lo mismo valorar la granulometría en un pigmento de recubrimiento superficial que en el diseño de un filtro o de un sedimentador, ni tiene la misma significación la distribución en frecuencia numérica con la distribución en frecuencia másica, por lo que los descriptores morfológicos han de ser los adecuados a cada situación so pena de que el análisis granulométrico no sirva absolutamente para nada (4) (Fig.8) **(15,16,19)**,

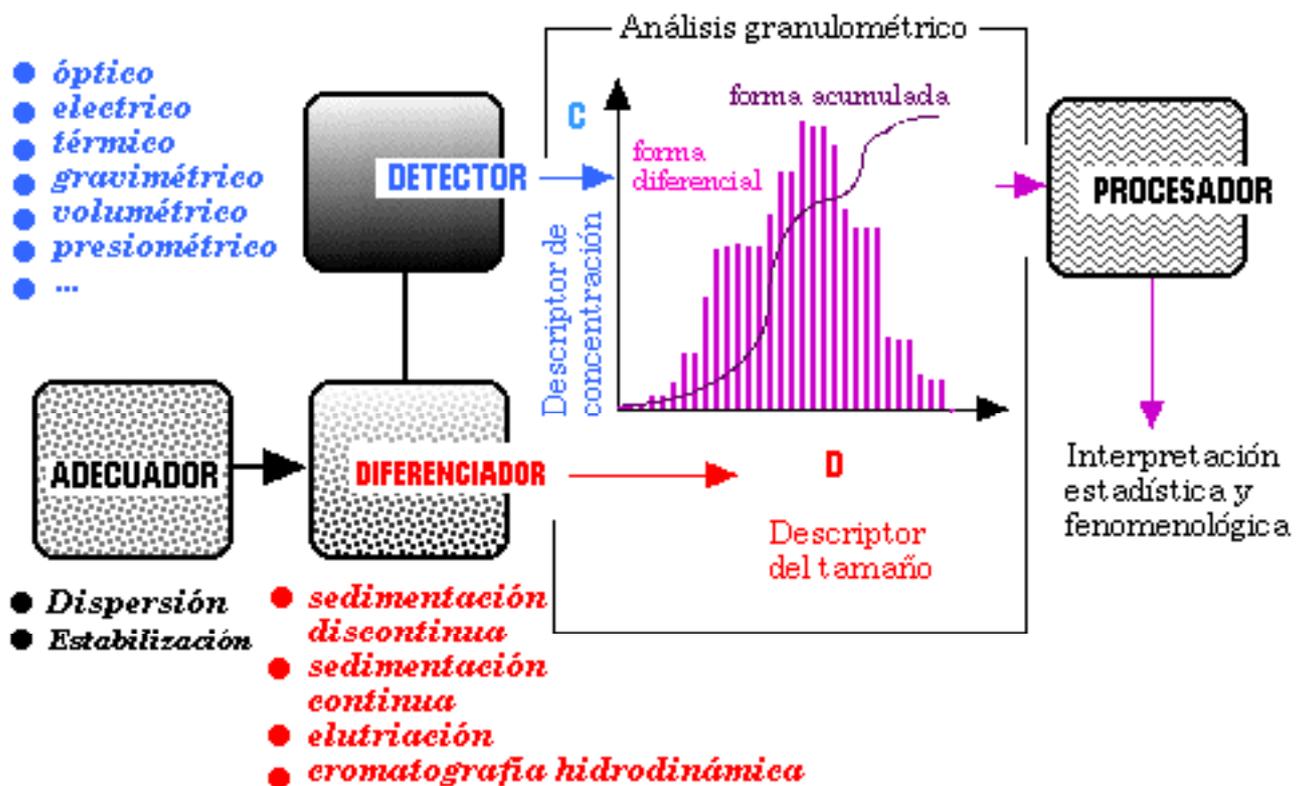


Fig.8. Elementos típicos de un analizador granulométrico: el caso particular de los sedimentómetros diferenciales.

La introducción de mecanismos más depurados de detección óptica y electromagnética, así como como la casi ilimitada capacidad de procesamiento de datos

mediante ordenadores acoplados - balanzas, lumosedimentadores, etc... ha permitido configurar técnicas muy potentes en el diseño preliminar de clarificadores. El análisis granulométrico permite conocer la cuantía relativa y absoluta de cada fracción granulométrica y, por tanto, vincular la eficacia de separación a unos determinados rangos de tamaño (Ver de nuevo la Fig.4)..

El segundo tipo de analizadores, también llamados *jar-tests*, suministran datos de velocidad masiva de sedimentación a partir del seguimiento del avance del frente de sedimentos (las pruebas clásicas de agentes coagulantes y floculantes se hacían en probetas de ensayo que han dado nombre a la técnica). La introducción de mecanismos más depurados de seguimiento de discontinuidades de primero (interfases) y de segundo orden (gradientes) y el procesado de datos mediante ordenadores acoplados ha permitido configurar técnicas muy útiles (5) en el diseño preliminar de sedimentadores espesadores a partir de un reducido número de ensayos con efluentes muestra y el recurso de métodos clásicos como los de Yoshioka-Keinath.

2.4.2. Sedimentadores separativos

Como ya se indicó, el **tamaño útil del recinto** depende del mecanismo de separación. Si éste es un fenómeno de transferencia el tamaño útil será la superficie eficaz abierta a dicha forma de transferencia, es decir, la superficie normal al flujo de propiedad. Si el fenómeno separador es una sedimentación gravitacional, el consumo de energía vinculado al transporte viscoso depende del área de la superficie interfacial, lo que justifica que una mayor superficie específica signifique una mayor transferencia y por tanto un **tiempo de relajación** más corto (Fig.2). Sin embargo, la superficie eficaz para el fenómeno macroscópico dedesplazamiento material será la superficie horizontal (24,26,27).

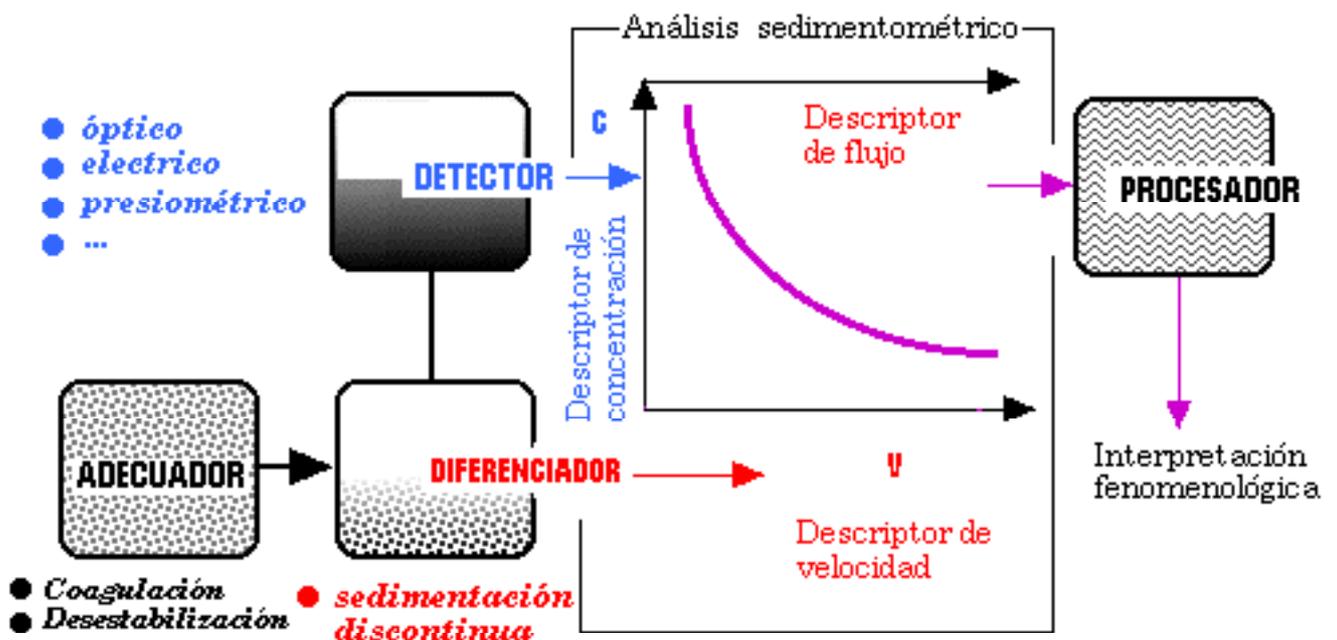
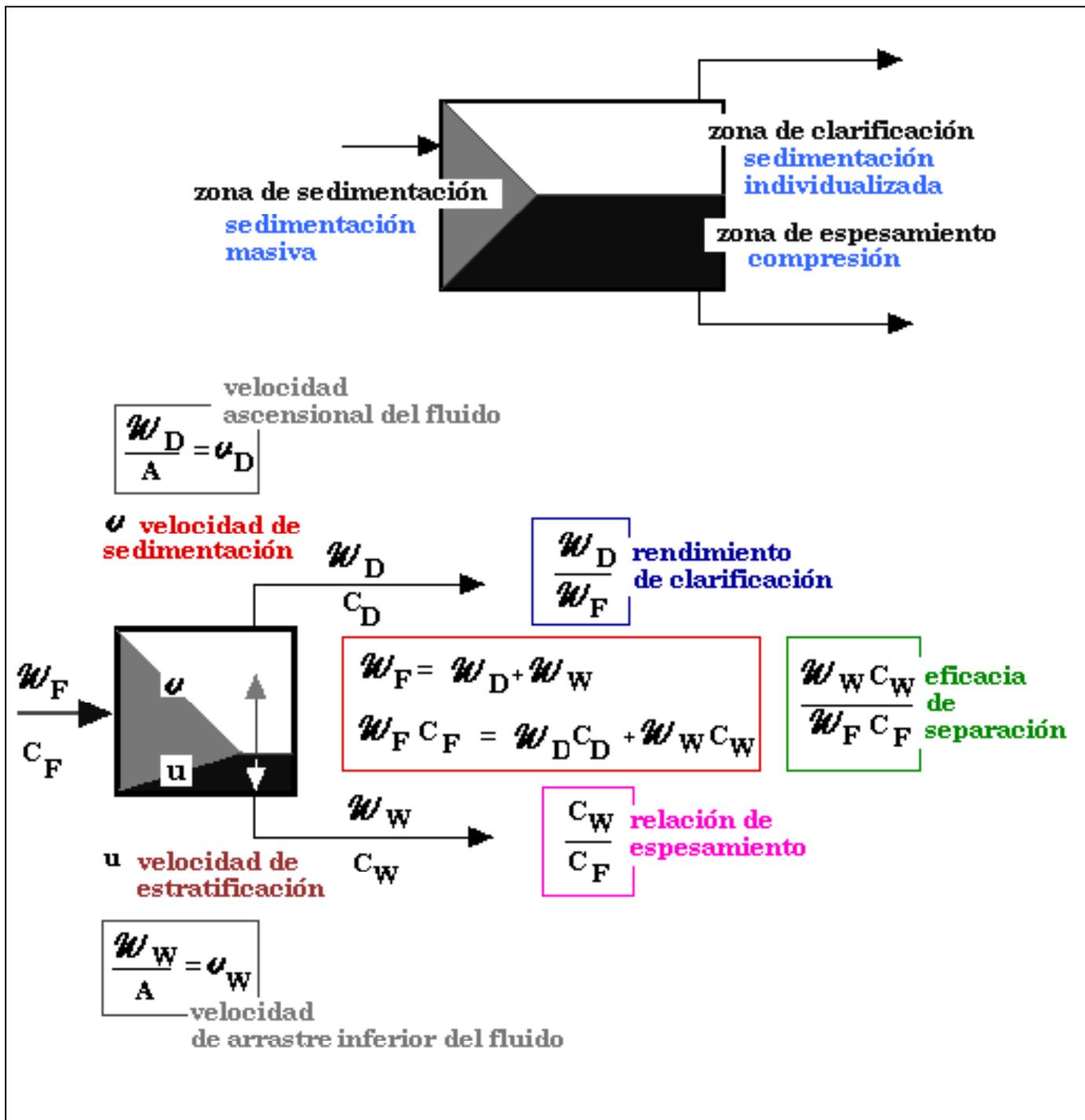


Fig.9. Elementos típicos de un sedimentómetro tipo jar-test

a. Relaciones estequimétricas básicas

De acuerdo con el modelo de sedimentación individualizada, el sistema ha de permitir que cada partícula que se desee retener tenga tiempo suficiente (tiempo de residencia) dentro del sistema separador como para abandonar la fase móvil (suspensión fluyendo por convección) y recorrer el espacio necesario para ubicarse de forma estable en la fase estática (sedimento no arrastrable). Preestablecida una eficacia separadora, la morfología del análisis granulométrico determinará el **diámetro de corte**, D_m , y el diseño de la región de clarificación habrá de hacerse en función de la retención de esta partícula límite.



**Fig.10. Elementos básicos para el diseño de un sedimentador real:
a. Regiones de un sedimentador; b Formulación de balances de materia**

De acuerdo con el modelo de sedimentación impedida - situación que tiene lugar inicialmente si la suspensión tiene las adecuadas condiciones de concentración y vinculación, y que también puede producirse en la región de concentración de sedimentos en un clarificador- el sistema ha de permitir que el frente de sedimentos que evoluciona con una determinada **velocidad de sedimentación** V_s abandone la fase móvil y quede retenido en la fase estática, en cuyo seno la **estratificación** ha de

permitir la estabilización de la capa de concentración deseada en el sedimento, de forma que se mantenga el régimen estacionario en la forma indicada en los balances de la Fig.10. Pero, a la vez ha de alcanzarse una adecuada **relación de espesamiento**, o, lo que es lo mismo, un razonable **rendimiento de clarificación**.

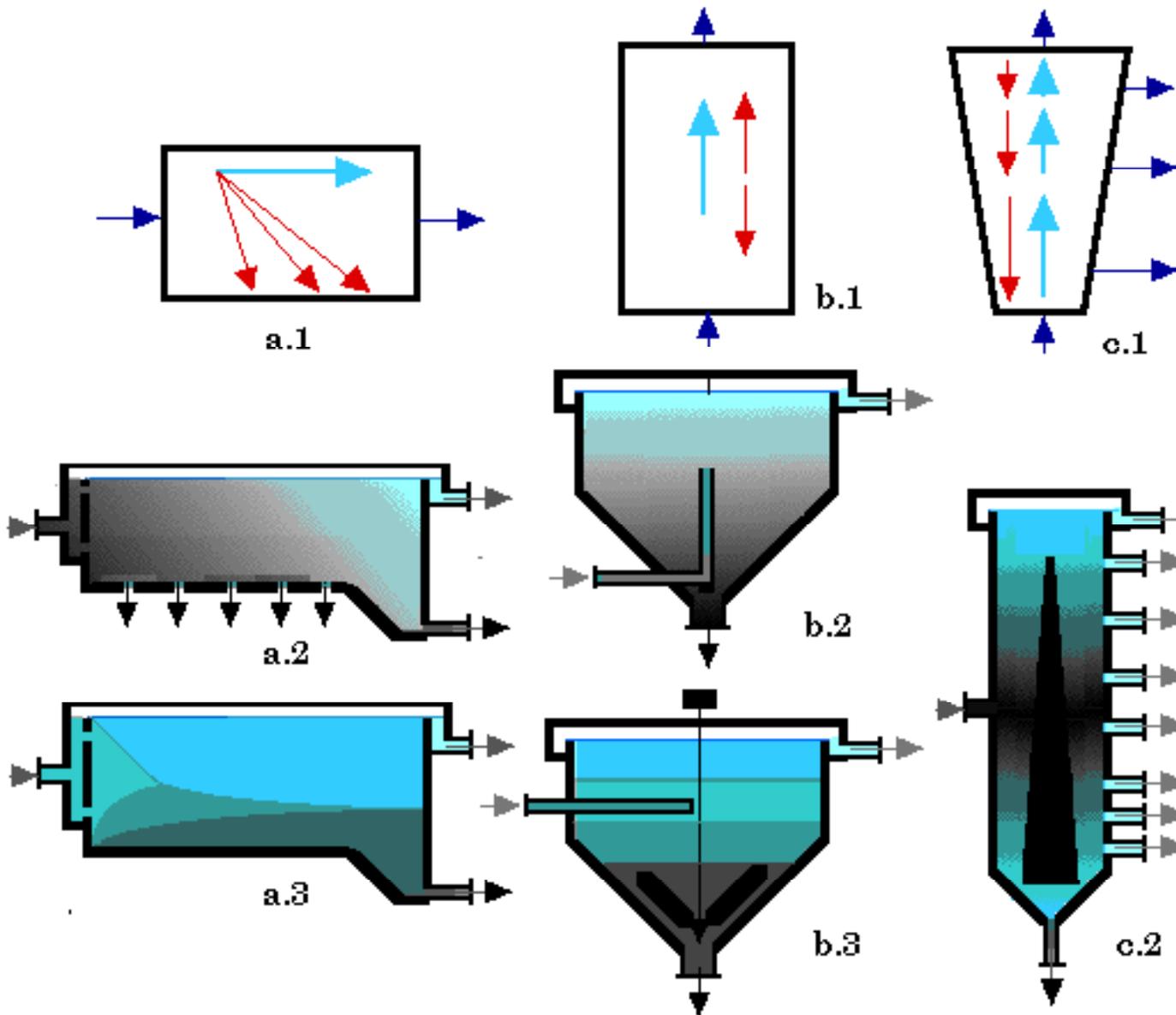


Fig.11. Configuraciones típicas de sedimentación: a. Flujo horizontal longitudinal y/o radial; b. Flujo vertical y/o radial-vertical con sección uniforme; c. Flujo vertical con sección variable; 1. Composiciones elementales de velocidades; 2. Aplicación a clarificación y clasificación; 3. Aplicación a espesamiento.

b. Condiciones de flujo

La mayor parte de los sedimentadores analíticos suelen ser **discontinuos** (muestreo *off-line*), ya que el flujo relativo no deja de introducir perturbaciones, aunque

sólo sea por efectos de pared, amén de bastantes dificultades operativas fáciles de imaginar. Los sedimentadores fraccionadores o clasificadores sí son más frecuentemente de tipo **continuo** o, al menos, utilizan como medio continuo fase fluida como medio de lavado o arrastre selectivo de una muestra de suspensión, como es el caso de los **elutriadores (25)**. En tal caso tiene interés separativo una configuración de flujo en contracorriente, de forma que seleccionando la velocidad ascensional se produjese una retención selectiva estática de partículas cuya velocidad de sedimentación coincidiese con la velocidad del fluido, o utilizando secciones diferentes se produjese una estratificación estable completa de las distintas fracciones. Sin embargo, una suspensión concentrada -un lodo- que se comportase próximamente al **modelo de Coe** no daría lugar a fraccionamiento **(1)**. Si el sedimentador operase en las dos mismas formas descritas, los frentes de la suspensión en el seno del medio fluido se comportarían como sendas discontinuidades de primer orden, desplazándose, en el caso ideal, como una onda cuadrada, con una velocidad de sedimentación global que sería función de la concentración de partículas.

Cuando se procesan cargas fluidas, tanto en transferencia como en reacción, se suele operar uniformizando instantáneamente las condiciones en todo el recinto, de forma que, en el ámbito de la modelización, los balances de propiedad se plantean como ecuaciones diferenciales con el tiempo como única variable. Distinto sucede cuando esta uniformización es indeseable técnicamente o inviable en la práctica - caso de transporte o transformaciones en el seno de fases sólidas -, en cuyo caso la modelización requiere ecuaciones diferenciales en el tiempo y en el espacio.

Cuando se procesa materia de forma continua, cada una de las fases implicadas lo hace en unas determinadas **condiciones hidrodinámicas**, es decir, con una determinada distribución interna de tiempos de residencia (flujo progresivo uniforme o de pistón, flujo en mezcla completa, flujo diferencial en dispersión etc...). Además, si la transferencia o la reacción se producen entre fases, éstas se enfrentan de acuerdo con unas **condiciones de contacto** - continuo, intermitente - y unas determinadas **pautas de flujo** (corrientes paralelas de igual o diferente dirección, flujo cruzado etc...) estereotipadas por la experiencia.

En el caso de sedimentadores es posible encontrar también la correspondencia con las formas de operación típicas. Tal y como se indica en la Fig.11, la morfología de los sedimentadores espesadores obedece a dos configuraciones básicas: Los sedimentadores de **flujo horizontal** - los longitudinales, generalmente de forma rectangular, y los de **flujo radial** generalmente de forma cilíndrica - corresponden al modelo hidrodinámico de **flujo de pistón** (permítasenos utilizar, por extensión, las siglas **PFS**), de forma que existe una correspondencia total entre el tiempo de residencia y la coordenada horizontal z, así como entre este tiempo y el de operación en condiciones de sedimentación por cargas. En sedimentadores de **flujo vertical**, si bien las condiciones hidrodinámicas de la fase líquida pueden seguir siendo las de flujo de pistón, en este caso en la dirección vertical las condiciones hidrodinámicas para la fase dispersa, sensible selectivamente al campo inercial, son las de un tanque homogéneo **(CSTS) (34)**. Así lo prueba el hecho de que sólo se estabilice en cada región - de hecho, recintos hidrodinámicos abiertos y en serie- una única concentración, como consecuencia de que existe una única densidad de flujo de sólidos S a través de la sección inferior del tanque (espesador) y una única, mínima, a través de la sección superior (clarificador), (Ver Fig.10) **(36)**.

Al comparar el comportamiento de un sedimentador espesador con un reactor autocatalítico, situación que podría tener su equivalente en transferencia de materia multicomponente con fuertes interacciones difusionales (por ejemplo, difusión contra gradiente), se pone de manifiesto de nuevo que operar con un objetivo de alta densidad de flujo de sólidos (alta cinética), es decir con un área menor para la misma carga, implica trabajar con baja compresión de lodos (baja conversión), planteándose el problema de optimización en términos semejantes en uno y otro caso.

c. Ecuaciones de diseño

Con esta información, el cálculo del tiempo de operación o del tamaño del recinto es inmediato a partir de las formas macroscópica y microscópica del balance diferencial de propiedad, cuya integración conjunta es función de cuáles sean las pautas de flujo y las condiciones hidrodinámicas antes mencionadas (Fig.12).

Como se ha indicado, el diseño de sedimentadores clarificadores en régimen de flujo individualizado se basa en la identificación de la partícula límite o tamaño de corte, quedando fijada la concentración de sobrenadante c_D por la fracción de la concentración total correspondiente a partículas de tamaño igual e inferior. Puesto que en condiciones de sedimentación individualizada es posible alcanzar fácilmente sedimentos compactados, nada impide utilizar como dato aproximado el que el sedimento abandone la cámara de separación a su concentración máxima de compactado c_m , lo que, en la práctica, reduciría el caudal inferior W_w al fluido ocluido en la porosidad externa, lo cual implica obviamente una sobreestimación del rendimiento de clarificación **(30-35)**.

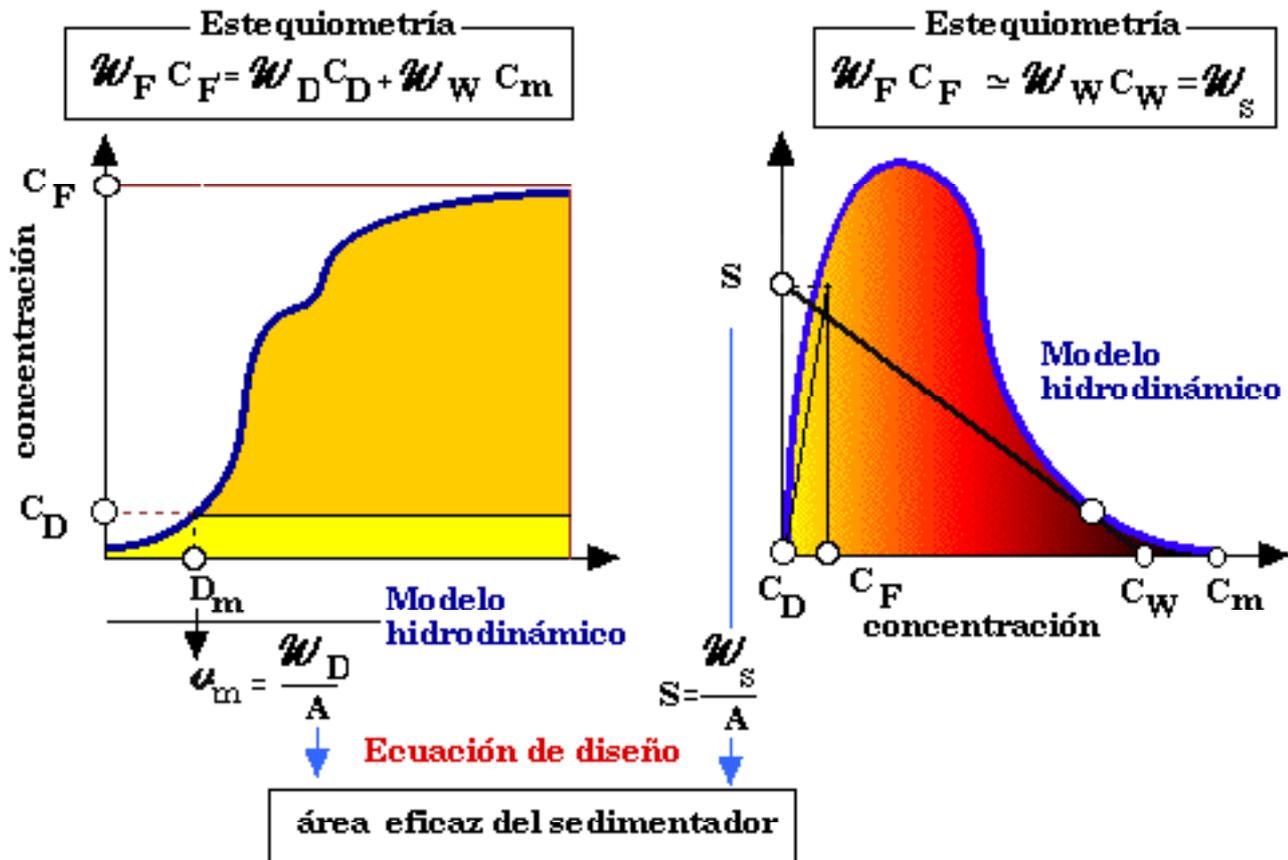


Fig. 12. Analogías y diferencias en la senda de cálculo para el diseño de sedimentadores en función del modelo hidrodinámico.

En el caso de sedimentación masiva, los métodos gráficos de Lakidara-Keinath y Yoshioka, que vieron la luz en una época de gran euforia por este tipo de imaginativas, elegantes e ilustrativas soluciones (en la Fig.12.b se utiliza el recurso de Yoshioka (2)), permiten identificar una solución del balance coherente con el modelo hidrodinámico. En este método la suposición es que el sedimento se estabiliza para una concentración máxima estable c_w , inferior a la concentración máxima de compactado, c_m , abandonando el recinto de sedimentación.

Sin embargo la analogía parece presentar una incoherencia en este punto: si en cinética física y en cinética química con exponentes $n > 0$ en el término de concentración, es sabido que la distribución de flujo **PF** es más eficaz que la **CST** para igual tamaño útil del equipo, la configuración de tanques de flujo horizontal resulta teóricamente igual de eficaz que la de flujo vertical (salvo manipulaciones tecnológicas en la ubicación de los rebosaderos que, como en el caso de sedimentación individualizada, la pueden hacer más eficaz a costa de alterar la distribución de flujo). La razón está en el producto y en la velocidad final por la que este se produce: en reacciones químicas el producto lo es en cualquier concentración. En sedimentación el producto no es el sólido, sino éste en una determinada concentración, ni la transferencia es eficaz hasta que éste se encuentra en la concentración deseada, preferentemente en la de equilibrio hidrodinámico, que es la que presenta la mínima proporción de líquido ocluido (una mayor concentración de sólido sólo se puede alcanzar por sinéresis o secado) (36).

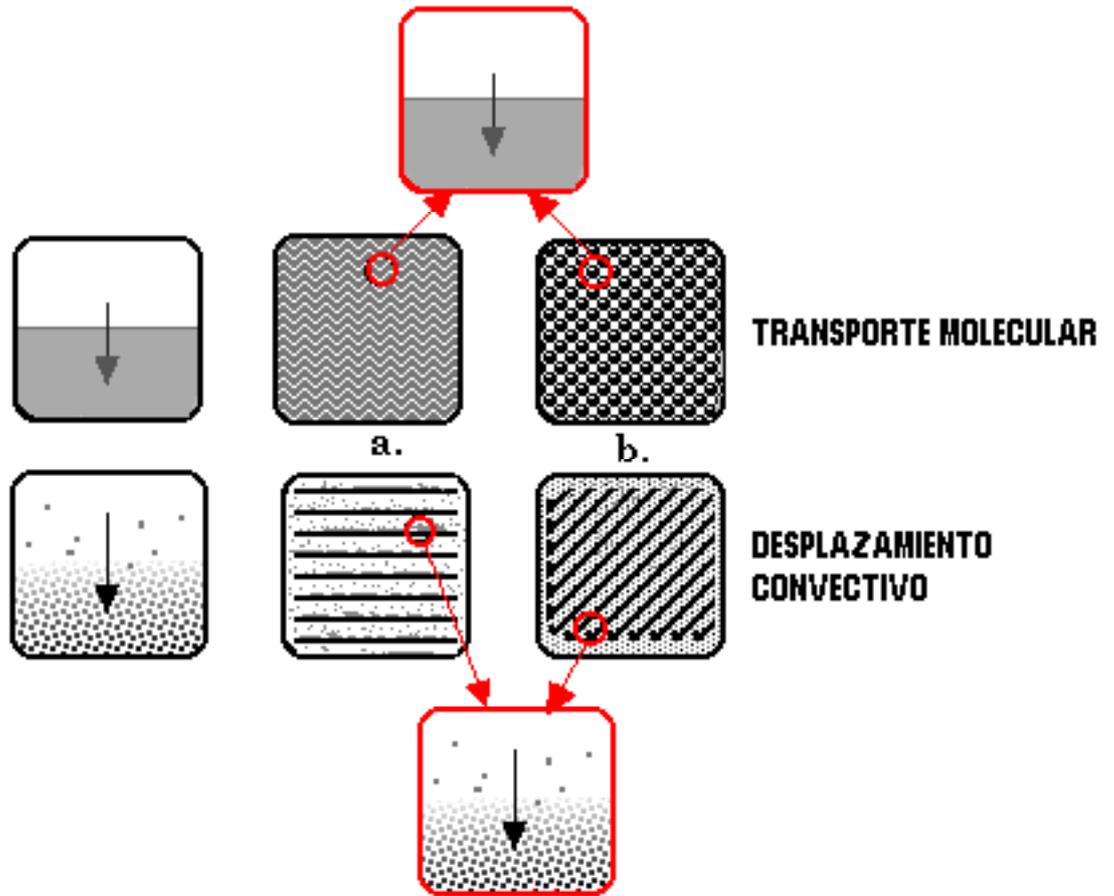


Fig.13. Incremento de la superficie de transferencia en transporte molecular y convectivo de materia mediante fragmentadores de flujo: a. Divisores de flujo; b. Rellenos y superficies ampliadas.

Si se dispone de la adecuada información sobre la forma interna del equipo involucrado, existirá una relación directa entre superficies y volúmenes útiles para la transferencia y la reacción y otras propiedades morfológicas externas o características del recinto, como puede ser su volumen aparente, su longitud o su altura, magnitudes estas dos últimas utilizadas en el caso frecuente de adoptarse la geometría tubular - depósitos, torres y columnas- aunque, obviamente, en sí mismas, no tienen significación alguna en la intensidad de transferencia. De hecho, la posibilidad de ampliar la superficie de transferencia por dispersión o creación de interfases mediante la presencia de materiales inertes (rellenos) encuentra su parangón en sedimentación, donde la división de flujo y el empleo de **superficies ampliadas** (lamelas) permite incrementar la relación superficie volumen del tanque, dando lugar a diseños más compactos.

El recurso a los conceptos de **etapas y unidades de transferencia**, cuando éstas no existen físicamente, es un formalismo que ayuda a la comprensión de la operación, pero que no suele aportar nada tangible desde el punto de vista del diseño. El concepto de **unidad de área** o **área unitaria** introducido en la bibliografía de sedimentación a través del método de Talmadge y Fitch está directamente relacionado con el concepto de **área de la unidad de sedimentación** (AUS), que se complementa con el **número de unidades de sedimentación**, (NUS) introducido por analogía con

los formalismos desarrollados en operaciones de transferencia y reactores químicos **(34,36)**.

En el terreno del diseño y operación de sedimentadores convencionales todo parece estar teóricamente bien asentado. Las principales dificultades vienen de la discrepancia con respecto al comportamiento ideal de flujo. Muchas de estas anomalías se traducen en variaciones de la distribución de concentración. La elección de uno u otro tipo de sedimentador concierne a las soluciones para regular la distribución de flujo y retirar eficazmente los sedimentos. Los retos intrínsecos del diseño conciernen primordialmente a la utilización de **superficies ampliadas** que no perturben la hidrodinámica global, la utilización de mecanismos combinados de sedimentación y filtración sobre el propio sedimento y al diseño óptimo de sedimentadores en régimen secuencial o programado.

3. DISEÑO DE LOS SEDIMENTADORES LAMELARES

3.1. Elementos para la elección o selección de equipos

En principio el equipo de sedimentación parece que ha de ser muy sencillo: sería suficiente con un tanque de gran área, pequeña altura y que no presente distorsiones de flujo. Como se ha visto, el **área superficial horizontal** tiene una significación esencial en el diseño de sedimentadores, mientras que el **volumen**, en lo que concierne al fondo o profundidad de los tanques, sólo tiene importancia en dos situaciones que no se analizan aquí: en el diseño de la **región de espesamiento**, particularmente cuando se trabaja en condiciones de sedimentación-filtración, y el diseño de sedimentadores flexibles **en sedimentación no estacionaria (32, 33)**, cuando la cámara de sedimentación ha de servir de amortiguador de fluctuaciones en condiciones de **sobrecarga** o **baja carga**. En el resto de los casos, la profundidad del tanque ha de ser dimensionada exclusivamente en función de evitar la resuspensión del sedimento por arrastre hidráulico. No obstante, cuando se trabaja a nivel industrial y en continuo, el equipo se diversifica, haciéndose más sofisticado, presentando incluso diferencias importantes en cuanto a su concepción para aplicaciones específicas (desarenado, sedimentación, espesado) en el tratamiento de aguas **(4,5,17,20)**.

Hay muchos criterios de clasificación posibles para sedimentadores decantadores, bien basándose en tamaño, en tipo de flujo, etc.; pero quizás la forma más sencilla sea la que los clasifica según las operaciones colaterales implicadas, cuestión que hemos abordado en un trabajo previo **(24)**:

Así, existen dos grandes grupos, sedimentadores dinámicos y sedimentadores estáticos. Los **sedimentadores dinámicos** suelen combinar el mecanismo de sedimentación con sistemas de movilización del sedimento por flujo continuo o pulsante, generalmente con el fin de producir efectos complementarios de **arrastre** o de **filtración** de sobrenadantes, de asentamiento del propio sedimento o de recirculación del mismo en condiciones de baja carga externa.

En los **sedimentadores estáticos** la única operación es la sedimentación gravitacional. A su vez, y de forma sencilla, se pueden clasificar en dos grupos:

Sedimentadores de **superficie libre**, o sedimentadores sin barrido, y sedimentadores **con barrido**. Los primeros son sedimentadores que no tienen un sistema específico de inducción o acarreamiento de flujo de sedimentos para retirar los sólidos depositados, por lo que son de tamaño pequeño y se usan para aguas poco cargadas de sólidos. Entre ellos están el decantador cilindro-cónico y el estático de flujo horizontal ya descritos someramente en la Fig.11. En los sedimentadores con barrido los sólidos depositados son retirados del tanque por algún medio mecánico (generalmente mediante rasquetas) o hidráulico, consiguiéndose un mayor espesamiento de los lodos. Entre ellos están los decantadores circulares con rasquetas, los longitudinales rectangulares, el de planta cuadrada con barrido circular, los de succión de sólidos y los decantadores-floculadores con cámara y doble sistema de arrastre de sobrenadante en superficie y de lodos en el fondo. Un tipo particular de los sedimentadores estáticos son los **sedimentadores de superficie ampliada**.

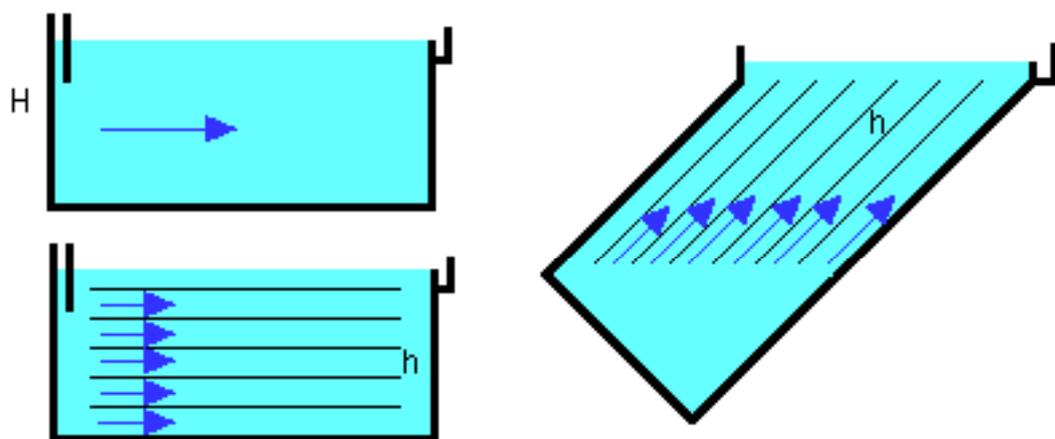


Fig.14. Sedimentadores y sedimentadores de superficie ampliada

Como se ha visto anteriormente, son muchas las posibilidades en cuanto a la forma, elementos y disposición de un sedimentador. La selección de equipos se basa, primero, en la **escala**, luego en el **modo de operación** (continua o discontinua), y luego en el **objetivo** (clarificación, espesamiento y separación (ambas)), lo cual condiciona principalmente el área de diseño y la forma de operación. Para la caracterización de la suspensión se sugieren tres pruebas sencillas que facilitan la mayor información posible: La **velocidad de sedimentación** se obtiene a partir de pruebas de *jar test* e indica tanto la clarificación como el tiempo necesario para poder efectuar la separación sólido-líquido y sus susceptibilidad a la adición de coagulantes y floculantes, y la **estabilidad del sólido**, utilizando como indicador el tiempo máximo que puede permanecer el lodo en el tanque sin arrastres o alteraciones que modifiquen su flotabilidad o textura. Mas allá de estos elementos básicos no se dispone métodos o programas rigurosos que ayuden a la **selección** del equipo adecuado, existiendo solamente algunas reglas heurísticas.

3.2. Superficies ampliadas

Fruto antiguo de la experiencia ha sido la utilización de superficies ampliadas, probablemente antes del conocimiento riguroso de los fundamentos del mecanismo. En principio se dispuso de equipos sedimentadores rectangulares de flujo longitudinal, divididos interiormente en placas horizontales, en la forma sugerida en

la Fig. 13.a, lo que era como si se dispusies en equipos iguales uno encima de otro. Sin embargo, esta disposición presentaba el inconveniente de la eliminación de los lodos, ya que incluso el arrastre mediante rasquetas resulta complicado, por lo que se pensó en utilizar la pauta del fondo de tanque, es decir, disponiendo estas placas en disposición inclinada, con un ángulo ligeramente superior al de talud del lodo (ver Fig.14) (20).

3.2.1. Elementos de diseño

En un sedimentador clásico de flujo horizontal y altura H, según la fórmula de Hazen (basada en el parámetro de Hazen, **carga superficial** W_F / A_{XY} , definido a partir del flujo volumétrico de la suspensión y del área eficaz, como una velocidad lineal), la **velocidad de sedimentación crítica** (Fig.15), resulta ser

$$v_{sc} = W_F / A_{XY} = H/t_H$$

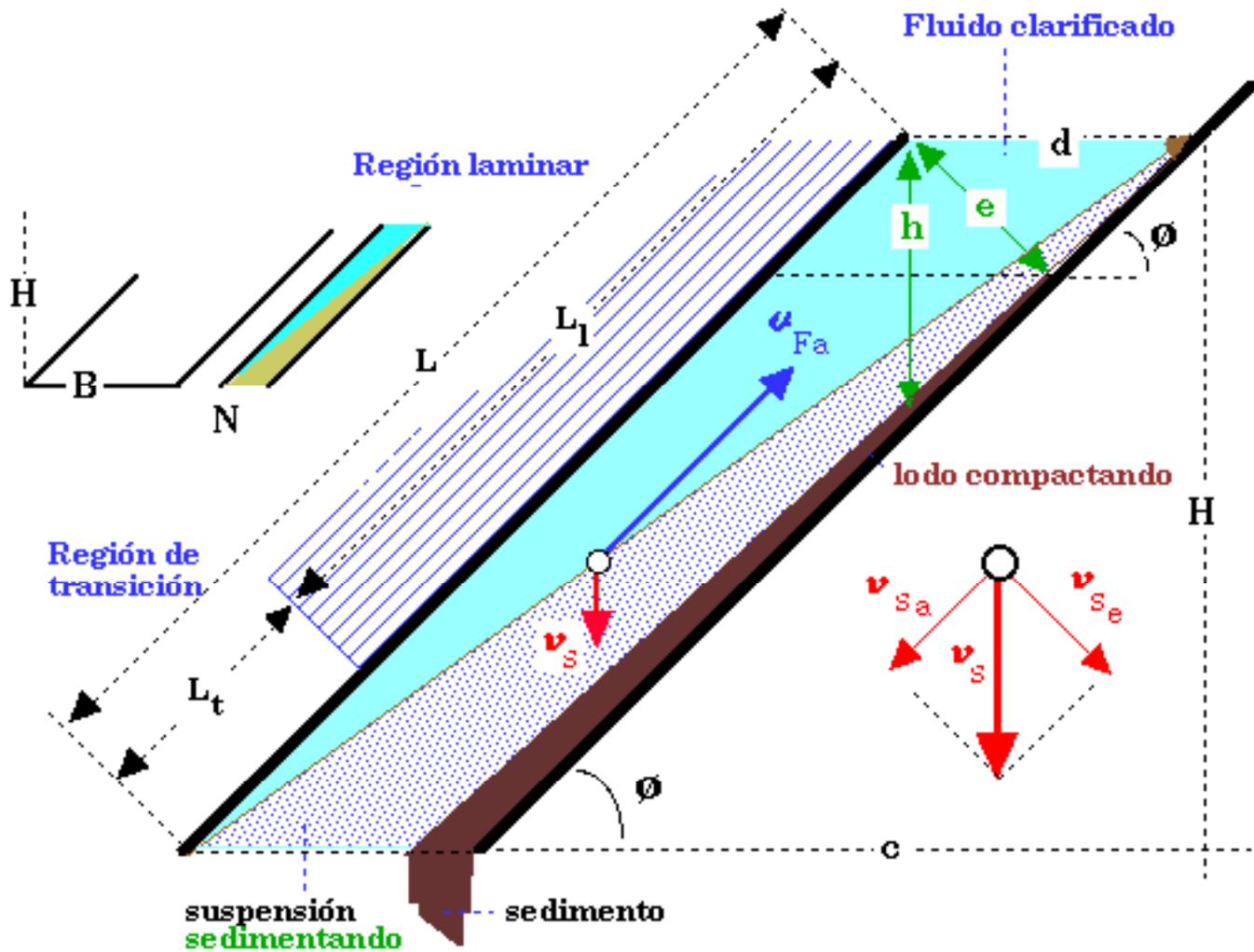


Fig.15. Definición de parámetros sobre un esquema representativo de una región interlamelar típica.

siendo t_H el **tiempo de retención** para un tanque de esa profundidad. Para el caso de un sedimentador lamelar, con N lamelas, de altura total H , siendo la altura de sedimentación h , se acepta que

$$h = H/(N + 1) \quad \text{ó} \quad h = H/(N - 1),$$

formulándose $N + 1$ cuando toda la zona de sedimentación esté llena de lamelas, por lo que entre las paredes y las lamelas adyacentes se generan zonas lamelares, y $N - 1$, cuando exista una zona delimitada de lamelas en el interior del sedimentador, considerándose no operativo el espacio exterior a esta zona. De esta expresión resulta:

$$t_h = h/v_{sc} = t_H/(N + 1) \quad \text{ó} \quad t_h = t_H/(N - 1)$$

por lo que, para una misma efectividad de separación de sólidos y altura total del equipo, se ha reducido significativamente el tiempo de retención.

De acuerdo con lo antes dicho, esta velocidad de sedimentación crítica puede aceptarse vinculada a la velocidad de sedimentación de una partícula límite o corresponderse con la velocidad de sedimentación masiva de una suspensión.

En la Fig. 14 se introducen otros parámetros típicos de diseño, cuya definición resulta bastante simple. Tal y como se indicó, y sin aventurar sobredimensionados u otros recursos para flexibilizar el diseño, se acepta que la sedimentación es eficaz si el recorrido de las partículas de corte (o el del frente de sedimentación), resultante de la composición de su propia velocidad con la velocidad de flujo, permite su depósito dentro de la superficie de la lámina (Ver Figs.15 y 16).

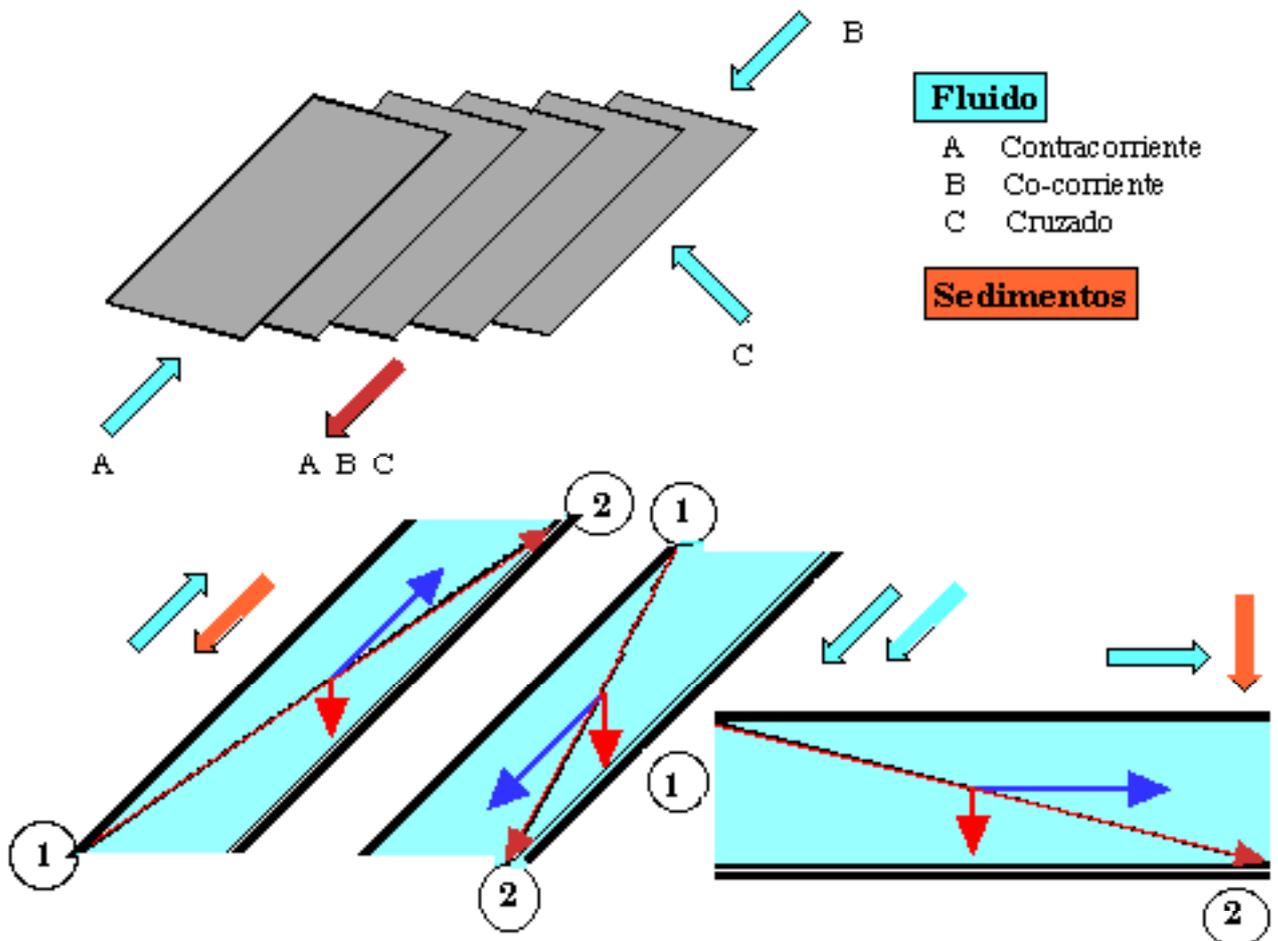


Fig. 16. Sedimentadores de superficies ampliadas: La trayectoria eficaz del

sedimento resulta de la composición de la velocidad de sedimentación y de la velocidad de flujo global de la suspensión

Tabla I. Análisis comparativo de los distintos esquemas de flujo

CARACTERÍSTICAS	RELACIONES DE DISEÑO	VALORACIÓN
Contracorriente		
<p>El líquido y los lodos siguen direcciones opuestas, el líquido asciende y los lodos caen (ver Figs.16 y 17)</p> <p>Las lamelas han de estar inclinadas más de 45°.</p> <p>(Ver Figs.16 y 18).</p>	<p>Tiempo de operación (recorrido de 1 a 2 en Figs.15 y 16) $t = e / v_S \cos \theta$</p> <p>Longitud mínima de las lamelas: $l = (v_{Fa} - v_S \cdot \text{sen}\theta) \cdot (e / v_S \cos \theta)$</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El agua se evacua en la zona de pocos sólidos • Buena distribución de flujo <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto ángulo de las lamelas para facilitar el deslizamiento de los lodos • Atascamiento por los lodos • Arrastre de lodos • Una parte de la lamela se bloquea por los lodos
Cocorriente		
<p>El líquido y los lodos siguen la misma dirección, ambos van hacia abajo.</p> <p>Lamelas de Axel-Johnson</p> <p>Las lamelas estarán inclinadas entre 30 y 35°.</p> <p>(Ver Figs. 16 y 18)</p>	<p>Tiempo de operación (recorrido de 1 a 2 en Figs.15 y 16): $t = e / v_S \cos \theta$</p> <p>Longitud mínima de las lamelas: $l = (v_{Fa} + v_S \cdot \text{sen}\theta) \cdot (e / v_S \cos \theta)$</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bajo ángulo de las lamelas • Los lodos son pre-espesados por el flujo de la suspensión • Se evitan los atascos <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precisa mayor área • Sensible a las variaciones de caudal • Los lodos pre-espesados se pueden resuspender al salir de la lamela • Una parte importante de la lamela se utiliza en la clarificación del agua debida a la resuspensión
Flujo cruzado		

<p>El líquido y los lodos llevan direcciones cruzadas, el líquido pasa transversalmente y los lodos caen.</p> <p>Las lamelas deben estar inclinadas más de 45°</p> <p>(Ver Figs. 16 y 19)</p>	<p>Tiempo de operación (recorrido de 1 a 2 en Figs.15 y 16) $t = e / v_s$</p> <p>Longitud transversal mínima de las lamelas:</p> <p>$B = v_{Fa} \cdot e / v_s$</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Buena distribución de flujo • Pocas interferencias entre el agua y los lodos • Buen espesamiento de lodos <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño elevado
---	--	--

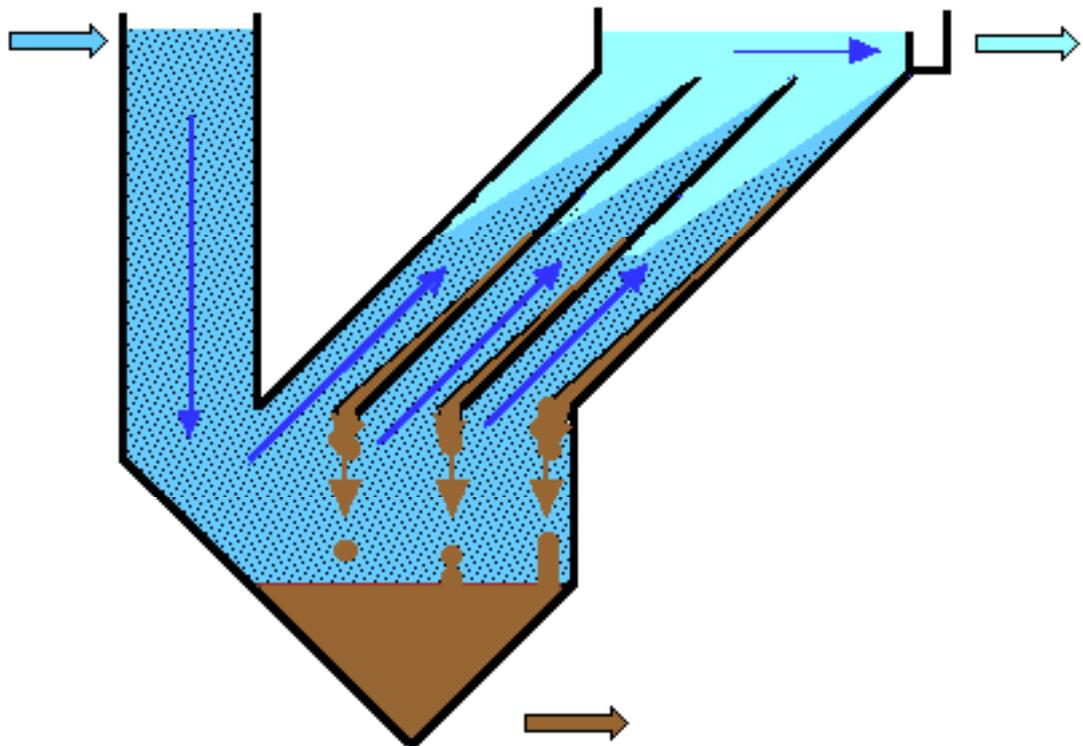


Fig. 17. Sedimentador lamelar en contracorriente

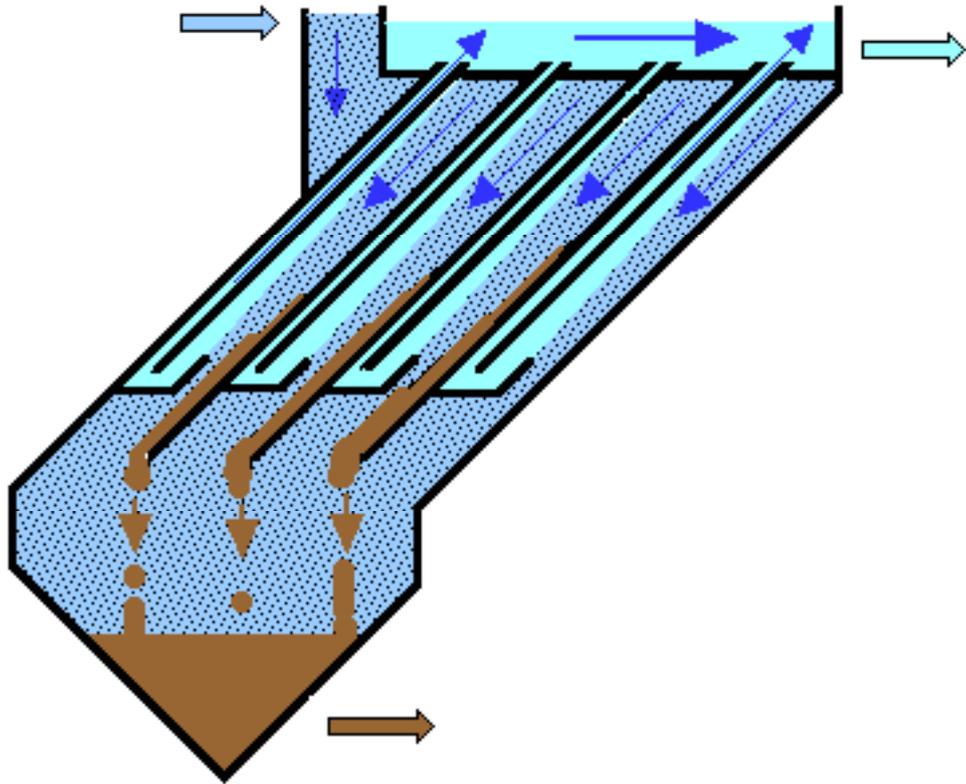


Fig. 18. Sedimentador lamelar en co-corriente

Tabla II. Características más relevantes de un sedimentador lamelar en contracorriente

CONDICIONES	DISEÑO	VALORACIÓN
-------------	--------	------------

Las condiciones que se han de tener en cuenta son:

• Flujo laminar

Para estar seguro de un flujo laminar el número de Reynolds ha de ser menor de 350 a 500, dependiendo del tipo de suspensión:

$$Re = v_{Fa} \rho h / \mu < 250$$

(forma preferible)

• Estabilidad de flujo

Para asegurar un flujo estable es preciso que el número de Froude sea mayor de 10^{-5} .

$$Fr = v_{Fa}^2 / g \cdot \rho h > 10^{-5}$$

• Velocidad crítica de flujo

La velocidad ascendente, v_{Fa} , debe ser menor de un cierto valor crítico a partir del cual existiría resuspensión de los sólidos, para algunos autores este valor es $5 \cdot 10^{-2}$ m/s; para otros v_{Fa} , estará comprendido entre 30 y 100 m/h, mientras que v_s será de 0,5 a 5 m/h. También se encontró que esta disposición evita las turbulencias y los cortocircuitos.

Bases de diseño

- Número de Reynolds entre 100 y 200
- Las inclinaciones se sitúan entre 35° y 60° sobre la horizontal, por encima de 60° disminuye mucho la eficacia, y por debajo de 35° el lodo se acumula en las lamelas.
- Separación de las placas 2 a 10 cm, preferente 3 - 5 cm
- Diámetro de los tubos es de 25 a 50 mm
- Altura vertical de las lamelas, $H = 0,5 - 0,8$ m
- Relación comercial de longitud/anchura de las lamelas, $l/B = 1,5 - 2,5$
- Situación de las lamelas por debajo del nivel del líquido = 0,4 m
- Factor de seguridad = 1.25

• Relaciones elementales:

(Ver Fig. 15)

$$L = l/e$$

$$v_{Fa} = W_F / (n + 1) \cdot e \cdot B \quad \text{ó}$$

$$v_{Fa} = W_F / (n - 1) \cdot e \cdot B$$

$$d = e / \sin \theta$$

$$h = e / \cos \theta = d \cdot \operatorname{tg} \theta = H / L \cdot \cot \theta$$

$$c = H / \operatorname{tg} \theta = l \cdot \cos \theta$$

$$H = l \cdot \sin \theta$$

$$v_{sc} = e / t_h = v_{sc} \cdot \cos \theta$$

$$t_h = v_{Fa} / l$$

• Relaciones de diseño:

- Componentes de la velocidad de sedimentación, v_s

$$v_{se} = v_{Fa} - v_s \sin \theta$$

$$v_{sa} = -v_s \cdot \cos \theta$$

siendo, v_{sa} la componente crítica de la velocidad de sedimentación

- Superficies características:
Area aparente de sedimentación:

$$A_s = N \cdot A_l \cdot \cos \theta = n \cdot B \cdot H / \operatorname{tg} \theta$$

Area proyectada

$$A_{yz} = B[(H / \operatorname{tg} \theta) + (N - 1)(e / \sin \theta)]$$

$$A_{yz} / A_{xy} =$$

$$(1/N) + [(e/H \cdot \cos \theta)][(N - 1)/N]$$

- Caudales

Fórmula empírica de Yao:

$$v_{sc} = v_{Fa} \cdot S / (\sin \theta + \cos \theta \cdot L)$$

$$W_F = 864 \cdot v_{Fa} \cdot \Omega / [\sin \theta + \cos \theta \cdot L]$$

siendo

$$L = (1 / \cos \theta) [(864 \cdot \Omega \cdot v_{Fa} / q) - \sin \theta]$$

Caso particular $\theta = 0$,

$$W_F = 864 \cdot v_{Fa} \cdot \Omega / L$$

siendo $L = 864 \cdot \Omega \cdot v_{Fa} / q$

- Estimación de L:
Para secciones cuadradas (e.e)

$$L = v_{Fa} \cdot e / (W_F / A_{xy})$$

Para secciones rectangulares (e.p)

$$L = 4(p + 1) / p \cdot (W_F / A_{xy})$$

- Estimación de L_t :

$$\text{Yao : } L_t = 0,0575 \cdot Re \cdot D_h$$

Schiller:

$$L_t = 0,028 \cdot Re \cdot D_h \quad (Re < 10)$$

$$L_t = 0,232 \cdot Re \cdot e \quad (100 < Re < 200)$$

Gomella:

$$L_t = 2,5 \cdot v_{Fa} \cdot e^2 \quad \text{Conductos cuadrados}$$

$$L_t = 5 \cdot p \cdot v_{Fa} \cdot e^2 / (p + 1) \quad \text{Rectángulos}$$

$$L_t = 5 \cdot v_{Fa} \cdot e^2 \quad \text{Placas infinitas}$$

Yao y Torres:

$$l = (a \cdot v_{Fa} \cdot e / \cos \theta \cdot v_s) - e \cdot \operatorname{tg} \theta +$$

$$+ 0,058 \cdot v_{Fa} \cdot e^2 / h$$

Problemas

Como **problema general** a todos los distintos equipos de sedimentación lamelar:

- atascamientos y olores debido al crecimiento biológico y presencia de aceites y grasas.
- Los atascos se solucionan a nivel práctico con lavados a contracorriente.

Como problemas inherentes al flujo en contracorriente están:

- Dificultad de buena distribución de flujo, fundamentalmente con gran número de lamelas
- Arrastre de los sólidos por el líquido ascendente debido a mezclas internas
- Arrastre de los sólidos depositados por el líquido al ascender
- Acumulación de los sólidos en las lamelas

Para evitar los problemas anteriores se han consignado las siguientes modificaciones:

- Uso de lamelas corrugadas para evitar las avalanchas de sólidos
- Flujo en co-corriente
- Flujo cruzado
- Disposición de conjunto de lamelas unas encima de otras, cada una inclinada en dirección opuesta, tipo zigzag, con lo que los sólidos distorsionarian poco el flujo del líquido
- Uso de rasquetas y sistemas de vibración para eliminar los sólidos
- Uso de materiales flexibles para más fácil limpieza de las lamelas

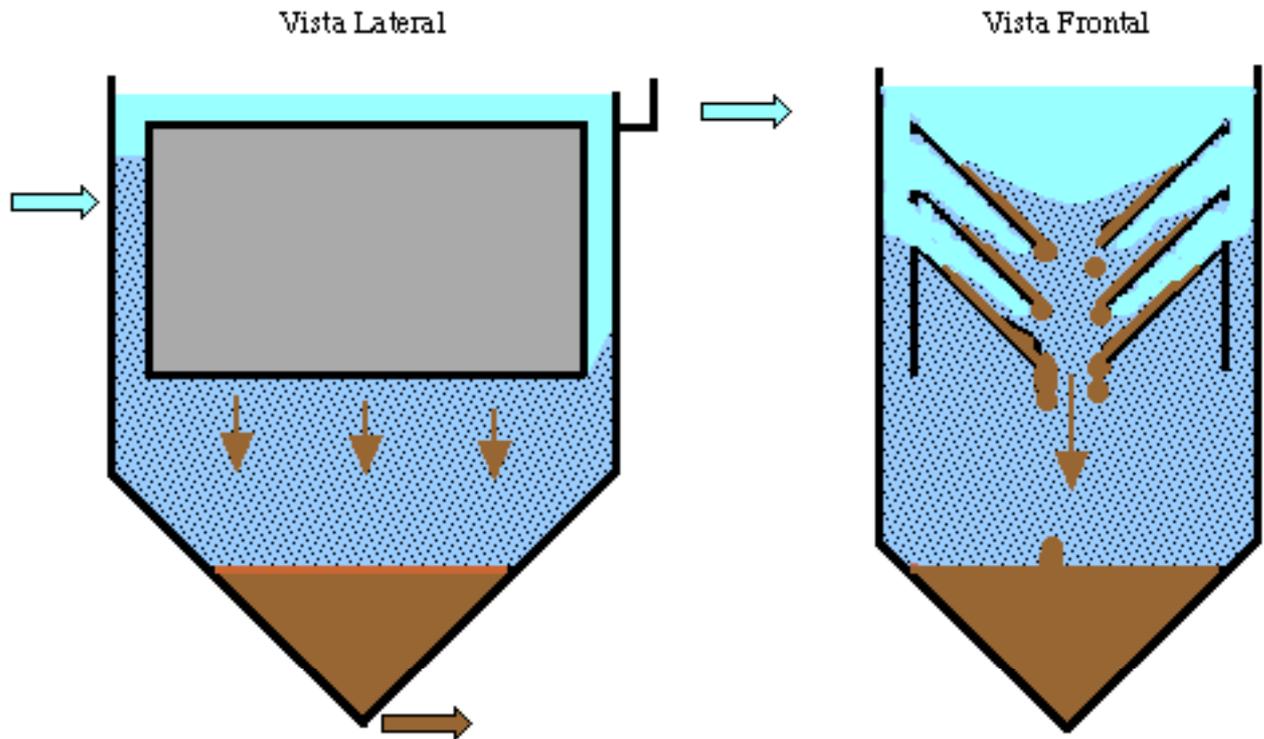


Fig.19. Sedimentador lamelar con flujo cruzado

De todo ello, se observa que en el sistema en contracorriente precisa unas lamelas de menor tamaño que el de flujo co-corriente, mientras que el sistema más adecuado es del flujo cruzado. Sin embargo, en la práctica suele utilizarse con más frecuencia el esquema en contracorriente salvo para aparatos compactos en baja carga.

Un objetivo de diseño es minimizar la relación A_{yz}/A_{xy} para unos valores preestablecidos de e , H y θ . Un valor de N suficientemente alto indica el número de veces que se ha aumentado el tamaño de un sedimentador clásico. En el límite, cuando N tiende a infinito, la ventaja se iguala a $H/(e/\cos\theta)$; siendo el denominador, $(e/\cos\theta)$, la distancia vertical entre lamelas adyacentes; o lo que es lo mismo, h , distancia máxima que debe recorrer una partícula para sedimentar.

Un factor de importancia en diseño es $L/l/e$, el cual al aumentar hace aumentar la eficacia al ocurrir que V_{sc}/V_{Fa} tiende a cero. Para $l/e > 20$ el aumento de eficacia no es significativo. L puede estimarse para algunas geometrías, como se indica en la tabla II.

Otro factor importante es el ángulo, θ , para $\theta = 90^\circ$ el sedimentador actúa como si fuese de flujo ascendente de tipo convencional, para $\theta = 0^\circ$ el sedimentador actúa como elementos colocados horizontalmente, máxima eficacia. Al aumentar el ángulo la eficacia disminuye, siendo más rápido esta disminución a partir de 45°

Conclusiones

Al llegar a este punto, y si no se han quedado solos en su exposición, los autores querrían haber transmitido, al menos, dos ideas.

Primera: Que el análisis riguroso de la sedimentación puede acometerse con la misma metodología y recursos que en otras operaciones básicas sustentan una adecuada modelización, imprescindible para el diseño flexible y el control fiable de la operación a toda escala.

Segunda: Que la sedimentación es una operación cuyas posibilidades no han sido aún explotadas, particularmente en el diseño de equipos compactos y en la simultaneidad de fenómenos separativos que permitan una optimización de su eficacia y selectividad, particularmente en la separación fraccional de mezclas multicomponentes.

En este sentido, los sedimentadores lamelares, optimizando el diseño hidrodinámico, mejorando los mecanismos auxiliares de remoción de sedimentos y dotándolos de adecuados sistemas de control, son instalaciones que pueden ser utilizadas eficazmente en tratamiento de aguas residuales en condiciones especiales, siendo susceptibles, por sus dimensiones, a su incorporación a plantas compactas, embarcables o transportables, donde pueden combinarse con procedimientos avanzados de depuración terciaria por vía química o radiativa.

BIBLIOGRAFIA

(Los autores son conscientes de haber incluido un número de publicaciones propias desproporcionado si sus aportaciones científicas o tecnológicas se comparan con las de algún otro autor también referido en la lista. Nuestra única pretensión ha sido revitalizar nuestro propio índice de citación y avalar modestamente el atrevimiento que supone pretender interesar a nuestros colegas químicos en una tecnología que podría emerger desde sus más clásicos fundamentos hacia nuevas posibilidades prácticas en el laboratorio y en la industria)

1. G.J. FITCH *A theory of sedimentation*, Trans Faraday Soc.,48, 188-176 (1952)
2. N. YOSHIOKA, *Study of the continuous thickening*, Kagaku Kogaku, 19,816-826 (1955)
3. J. COCA, J. L. BUENO . *Dinámica de partículas en suspensión sólido-líquido (I): sedimentación de partículas*. Ingeniería Química, nº 98, 153-162 (1977).
4. E. OBATA, H. WATANABE, *Experimental investigation of the operation of an inclined continuous thickener by the use of vertical and inclined solid-flux curves*, Int. Chem. Eng., 20, 3, 439-445 (1980)
5. W.F. LEUNG, R.F. PROBSTEIN, R.F., *Lamella and tube settlers. 1. Model and operation*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 22, 58-67 (1983)
6. J. COCA, H. SASTRE Y J. L. BUENO. *Zeta potential and coagulant action on coal slurries*. J. Chem. Eng. of Japan, 16, 4, 335-338 (1983).
7. J. L. BUENO, A. G. LAVÍN, J. D. FERNÁNDEZ Y J. COCA. *Dimensionado, operación y control de una planta piloto para floculación-sedimentación de lodos de carbón*. Ing. Quím. 188, 41-46 (1984).
8. C. TREYSSAC, M. MAES, M., *Maitrise de la séparation lamellaire: Expérimentations et performances*, Curso "Les techniques de separation liquide solide", Terrassa, (1985)
9. J. COCA, J. L. BUENO Y E. CUESTA. *Dimensionado de sedimentadores espesadores: Un programa de cálculo*. Tecnología del Agua, 19, 67 (1985).
10. J. COCA, J. L. BUENO Y H. SASTRE *Influencia de polielectrolitos sobre las propiedades electrocinéticas y superficiales de partículas de carbón* Afinidad, 42, 399, 513-518 (1985).
11. J. L. BUENO, A. G.LAVÍN. *Teoría y práctica de la sedimentación I: Fundamento de sedimentación espesamiento*. Ingeniería Química, 208, 159-175 (1986).
12. J. L. BUENO, A. G.LAVÍN Y J. COCA. *Teoría y práctica de la sedimentación II: Operaciones de sedimentación individualizada*. Ingeniería Química, 210, 131-139 (1986).
13. J.L. BUENO, A. G.LAVÍN Y J. COCA. *Teoría y práctica de la sedimentación III: Operaciones de sedimentación-espesamiento*. J. L. Bueno, A. Gutiérrez y J. Coca. Ingeniería Química, 213, 65-77 (1986).
14. J. L. BUENO Y J. DIZY. *Correlation for shape and size of individual particles*. J. Bulk Solids & Powder Technology, 11, 4, 1-8 (1987).
15. J. L. BUENO Y M. C. GUTIÉRREZ. *Design of a prototype on an A/D photosensible sedimentograph*, Powder Technology , 44, 366-367. (1987).
16. J.L.BUENO, J.C. CAÑIBANO *Sedimentógrafo Fotosensible analógico-digital*. HUNOSA (nº 8800257, 1988).
17. J. TABERA, M.A. IZNAOLA, *Design of a lamella settler for biomass recycling in continuous ethanol fermentation process*, Biotechnol. Bioeng., 33, 1296-1305 (1989)
18. J. L.BUENO Y C. GUTIÉRREZ. *Propiedades morfológicas de fases particuladas*. Ingeniería Química, nº 259, 299-307, octubre (1990).
19. J. L. BUENO, J. COCA, E. CUESTA, A. G.LAVIN Y G. VELASCO.*Sedimentation of coal slurries: A procedure for the determination of the solid flux curve useful for the design of continuous settling tanks*. Powder Technol. 63, 133-140 (1990).
20. R. MARIN, J.M. RODRIGUEZ, *Efectividad práctica de la decantación lamelar aplicada a dos decantadores convencionales de lecho de fangos*, Tecnología del Agua, 89, 24-31 (1991)
21. J. L. BUENO Y C. GUTIÉRREZ. *Caracterización de partículas por su forma y tamaño*. Ingeniería Química, nº 265, abril (1991).
22. A. G. LAVÍN, R. GARCÍA Y J. L. BUENO. *Diseño y operación de sedimentadores-espesadores en el tratamiento de aguas*. Tecnología del Agua, nº 100, 41-47, (1992)

23. J. L. BUENO, J. J. LORENZANA Y R. GARCÍA. *An empirical model on the efficiency of commercial polyelectrolites on secondary settlers design*. J. Powder Technology Eng., 75, 119-125 (1993).
24. J. L. BUENO, A. G. LAVÍN, M. MUÑIZ Y R. GARCÍA. *Separaciones sólido-líquido: Selección de equipos de sedimentación*. Tecnología del Agua, n° 120, 26-32 (1994).
25. J. L. BUENO, A. GUTIERREZ LAVÍN, J. COCA Y R. GARCÍA. *Un modelo de elutriador ideal y su aplicación en análisis granulométricos*. Latin American Appl. Research, 24, 99-108 (1994).
26. M.MUÑIZ, R.GARCÍA, A.G.LAVÍN, J.L.BUENO. *Planta piloto de sedimentación floculación.(I) Elementos para el diseño de operacioes de sedimentación continua en régimen transitorio*. Ing.Quím. n° 315, 115-119 (1995)
27. M.MUÑIZ, R.GARCÍA, A.G.LAVÍN, J.L.BUENO. *Planta piloto de sedimentación floculación (II): Descripción del equipo y del sistema de control*. Ing.Quím. n° 316, 163-167 (1995)
28. J.L. BUENO , A.G. LAVÍN, J. DIZY. *Advantages of estimating settling rates of fine particles with nomographs*, Hydrobiologia, 325, 47-63, (1996)
29. J.L.BUENO, H.SASTRE, A.G. LAVIN (Eds), Contaminación e Ingeniería Ambiental, Tomos I-IV ISBN. 84-923131-4-5, FICYT 1997
30. M.MUÑIZ, H.BERTHIAUX, J.L.BUENO Y A.G.LAVÍN. *Modelos hidrodinámicos en sedimentación y espesamiento*. Ing. Quím., julio-agosto 1997, 177-182
31. M.MUÑIZ, H.BERTHIAUX, A.G. LAVÍN, J.L.BUENO. *Pilot-Plant studies of non-steady sate continuous sedimentation: Hydrodynamics and solids distribution profiles*. Powder Technology 96, 267-274 (1998)
32. M.MUÑIZ, A.G. LAVÍN, J.L.BUENO. *The electrical measurement of solid concentration as a method to control non steady state continuous sedimentation*. Powder Technology (En revisión, 2001)
33. M.MUÑIZ, H.BERTHIAUX, A.G. LAVÍN, J.L.BUENO. *Distribution of residence time in continuous sedimentation tanks*, Canadian J.of Chemical Engineering (en prensa, 2002)
34. J.L.BUENO, A.G. LAVÍN, M.MUÑIZ, *CST and PFR-like flow conditions in continuous hindered settler: A fortunate extension of the phoenomenological SL analogy*. Powder Technology (En revisión, 2001)
35. A.G. LAVÍN, J.L.BUENO, *Solid distribution in continuous stationary and non-stationary settlers*. Chinese J.of Chemical Engineering (Aceptado para su publicación, 2002)
36. J.L.BUENO, *Ciencia y Tecnología de Partículas: Introducción a las Operaciones básicas con sólidos*. Editorial Síntesis (En prensa 2002)

SIMBOLOS

A	Superficie de transferencia
A	Superficie de transferencia por transporte molecular
Al	Area de la lamela
Ap	Area total proyectada
A _{xy}	Area de la superficie vertical del sedimentador
A _{xy}	Area eficaz o área de la superficie horizontal del sedimentador
B	Anchura de las placas o lamelas
C	Longitud de la proyección de la lamela en el plano horizontal
c _D	Descriptor de la concentración de sólidos en el clarificado
c _D	Descriptor de la concentración de sólidos en el clarificado
c _F	Descriptor de la concentración de sólidos en la alimentación
c _m	Descriptor de la concentración de máxima de sólidos en compactación
c _P	Descriptor genérico de la concentración de partículas
c _w	Descriptor de la concentración de sólidos en el concentrado
D	Descriptor genérico de las distintas formas del tamaño de partícula: Ej. tamaño de Stokes
d	Separación horizontal entre lamelas
D _h	Diámetro de la tubería cilíndrica equivalente a efectos hidráulicos ($D_h=4rh$)
e	Separación normal entre lamelas
E _c	Energía cinética
E _k	Energía cinética específica
E _v	Energía transferida por transporte molecular a través de una interfase
	Energía potencial: Ej. En un campo gravitacional
	Energía de interfase
E _p	Función de la concentración en un análisis granulométrico
E _σ	Coefficiente de transporte de energía viscosa en forma de factor adimensional
F	de fricción
f	Fuerza impulsora característica: Ej. Empuje gravitacional
	Aceleración de la gravedad
F _k	Altura total del sedimentador o altura vertical del conjunto de lamelas
g	Distancia vertical entre lamelas
H	Forma genérica de un coeficiente de transporte
h	Forma del coeficiente cinético para sedimentación
k	Longitud de las lamelas, generalmente en forma de longitud relativa o
k _s	relación adimensional referida a la distancia normal entre ellas(=
L	l/e)
	Longitud de la lamela
l	Longitud relativa de la zona de flujo en transición a lo largo de la lamela (=
L _t	l _t /e)
l _t	Longitud de la zona de transición de la lamela
L _l	Longitud relativa de la zona de flujo laminar a lo largo de la lamela (= l _l /e)
l _l	Longitud de la zona laminar de la lamela
N	Número de lamelas en batería
n	Orden o exponente de la concentración en los modelos cinéticos
p	Densidad de flujo de propiedad en tránsito por transporte molecular
P	Presión
p	Lado de un rectángulo
Re	Distintas formas de la relación adimensional de Reynolds

R_h	Radio hidráulico (Superficie libre al flujo /Perímetro de la sección de flujo)
S	Concentración de cantidad de movimiento o densidad de flujo hidrodinámico de materia sedimentando
t	Tiempo
t_H	Tiempo de retención en un sedimentador normal de altura H
t_h	Tiempo de retención en un sedimentador lamelar de altura de sedimentación h
t_r	Tiempo de residencia
U	Energía interna
u	Descriptor de la evolución de la distribución de concentración de sedimentos evaluado como velocidad de propagación ascensional de un estrato de determinada concentración c
V	Volumen
v_F	Velocidad global media de desplazamiento de una fase fluida
v_P	Velocidad de desplazamiento de una partícula
v_S	Velocidad de sedimentación o desplazamiento de un conjunto de partículas
v_{Sc}	Velocidad de sedimentación crítica para cualquier mecanismo
v_{Se}	Componente de la velocidad de sedimentación en la dirección normal a la lamela
v_{Sh}	Componente de la velocidad de sedimentación en la dirección de flujo entre lamelas
v	Velocidad de desplazamiento de una partícula aislada en un medio de extensión indefinida
W_D	Descriptor del caudal volumétrico o másico de clarificado por sedimentación
W_F	Descriptor del caudal volumétrico o másico de alimentación
W_S	Descriptor del caudal volumétrico o másico de sólidos sedimentando
W_W	Descriptor del caudal volumétrico o másico de concentrado por sedimentación
δ	Espesor de la capa límite para un determinado fenómenos de transporte
ε	Fracción de huecos, porosidad hidráulica
ν	Viscosidad cinématica del fluido
\varnothing	Angulo de inclinación de las superficies ampliadas
ρ	Densidad
σ	Descriptor genérico del modelo de interfase: Ej. Tensión interfacial
τ	Tensor esfuerzo de zizalladura, :
Ψ	Descriptor genérico de la morfología, esfericidad, circularidad
μ	Descriptor genérico del modelo reológico : Ej. Viscosidad
Ω	Coefficiente empírico: 4/3 para tubos; 11/8 para conductos de sección cuadrados; 1,00 para placas

