

## Estudio de los efectos del campo acústico sobre suspensiones de partículas finas en medios líquidos

José Antonio García Fernández, Enrique Riera Franco de Sarabia  
Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas, Instituto de Acústica, CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid

### Abstract

The interactions induced by an acoustic field in aqueous suspensions of particles present notable differences with respect to those present in aerosols. This is due to the physical and chemical properties of the medium, and the near-unity entrainment coefficient of the particles. A theoretical analysis is presented which discusses the main factors affecting the classic mechanisms of the acoustic agglomeration of particles. Also, an experimental visualization technique is used to examine particle-particle interactions in an aqueous suspension. The results of this research will improve the enhancement of solid-liquid filtration systems for industrial processing.

### Introducción

El fenómeno de la aglomeración acústica de partículas ha sido ampliamente estudiado en el caso de los aerosoles con el principal objetivo de eliminar partículas en el rango submicrónico ya que son nocivas para la salud y con los métodos tradicionales de filtración-retención no se pueden eliminar. La extrapolación al medio líquido resulta igualmente interesante ya que el desarrollo de sistemas de filtración asistidos ultrasónicamente abre un nuevo campo de aplicación industrial. En este trabajo se estudian suspensiones formadas por partículas finas de Zinc y TiONa con el objetivo de producir aglomeración y así mejorar la eficiencia del proceso de separación sólido-líquido en procesos de filtración.

### Mecanismos que intervienen en la aglomeración acústica

#### Interacción ortocinética

Cuando aplicamos un campo acústico  $u_y = U_0 \cos(\omega t - kx)$  a una suspensión acuosa de partículas sólidas, aparece en éstas un movimiento vibratorio inducido en el que sus desplazamientos dependen de la partícula (naturaleza, tamaño...), así como de la frecuencia. Para bajas frecuencias todas las partículas siguen el movimiento del medio, pero a medida que aumenta la frecuencia las más pequeñas siguen el movimiento mientras que las grandes permanece prácticamente en reposo, apareciendo una diferencia en amplitud entre las partículas, que va a favorecer la colisión. La ecuación más general que rige el movimiento de las partículas viene dada por la ecuación BBO<sup>(1)</sup> (Basset-Boussinesq-Oseen) para una partícula esférica en un fluido viscoso incompresible. La solución de esta ecuación es de la forma:

$$\frac{U_p}{U_0} = \frac{1 + 1.5\sqrt{\delta\omega\tau} \pm (1.5\delta\omega\tau + 1.5\sqrt{\delta\omega\tau})}{1 + 1.5\sqrt{\delta\omega\tau} \pm [(1 + 0.5\delta)\omega\tau + 1.5\sqrt{\delta\omega\tau}]} \quad (1)$$

donde  $\delta = \rho_0/\rho_p$ ;  $\tau = 2\rho_p a^2/9\mu$ ;  $\rho_p$  es la densidad de la partícula,  $\rho_0$  la densidad del medio fluido,  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido,  $a$  el radio de la partícula,  $U_0$  la amplitud de la velocidad del sonido y  $U_p$  la amplitud de la partícula.

En un medio líquido todas partículas (tanto las pequeñas como las grandes) son arrastradas por el campo acústico para frecuencias medias y bajas, teniendo que subir en frecuencia hasta el rango de centenares de

kHz para que exista una diferencia de arrastre entre partículas de distintos tamaños. En la figura 1 se puede observar que el efecto ortocinético sólo puede tener efecto, cuando aumentamos el diámetro de la partícula (en torno a 20µm para una frecuencia superior a 20 kHz).

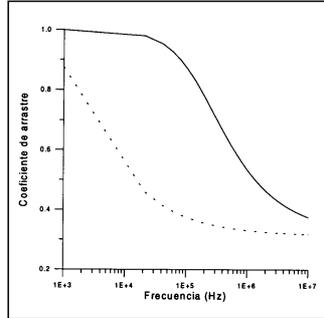


Figura 1. Arrastre de partículas en agua en función de la frecuencia: 2µm (trazo continuo) y 20µm (trazo discontinuo).

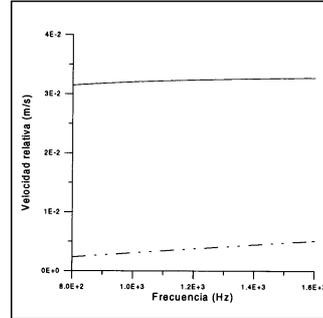


Figura 2. Efecto estela en aire (trazo y en agua (trazo discontinuo) para partículas de TiONa.

#### Efecto estela

La interacción hidrodinámica entre partículas inmersas en un medio líquido bajo condiciones de flujo de Oseen debido al efecto de un campo acústico, se ve muy desfavorecida con respecto a los aerosoles debido a que el coeficiente de arrastre es muy alto, y en consecuencia apenas perturban el campo de flujo que las rodea. La velocidad de atracción mutua entre partículas monodispersas obtenida por Dianov<sup>(2)</sup> es

$$u_{12} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{3a_1U}{2d} \left( 1 + \frac{a_1U}{\pi\nu} \right) - \frac{1}{d} \left( \frac{6a\nu}{\pi} + \frac{9a^2U}{16} \right) \right] \quad (2)$$

en donde  $d$  es la distancia entre partículas,  $\nu$  la viscosidad cinemática del medio y  $1e$  el coeficiente de fluidez de una partícula aislada en un campo acústico bajo condiciones de flujo de Oseen. Este modelo debe aplicarse bajo las siguientes condiciones: 1)  $d \gg \nu / |\mathbb{U}_0|$ ; 2)  $0.5 < Re < 1$  (Los límites no quedan establecidos en la literatura, el límite inferior se suele escoger en 0.5 que se corresponde con la transición entre el régimen de Stokes y el de Oseen. El límite superior es aun más controvertido, se suele escoger 1 pues a partir de ese punto, las fuerzas inerciales se hacen mayores que las viscosas), donde  $Re$  es el número de Reynolds; y 3)  $a^2 f \ll 1$ .

En la figura 2 se muestra la diferencia numérica que existe entre el efecto estela en agua y en aire, para partículas de TiONa, para un rango de frecuencias en el que se cumple el modelo de Dianov.

#### Efecto de la presión de radiación

Cuando se establece un campo acústico estacionario en un fluido viscoso en presencia de partículas, aparece una fuerza de arrastre debida a la distribución no uniforme de densidad de energía alrededor suyo, cuya expresión mas general para el caso de una esfera compresible viene dada por

$$F_R = \frac{8}{3} \pi a^2 (ka) \left( \frac{2.5 - \delta}{2 + \delta} - \delta \varepsilon^2 \right) E \sin(2kx) \quad (3)$$

donde  $k$  es el número de onda,  $E$  la densidad de energía y  $\varepsilon = c_0 / c_p$  la velocidad relativa del sonido. Esta fuerza arrastra a las partículas a los nodos de presión (para partículas más densas que el medio) o a los nodos de velocidad (para partículas menos densas que el medio). Además de este primer efecto se pueden incluir otros secundarios que ocasionan que dos partículas cuya línea de centros sea perpendicular a un campo acústico se atraigan, mientras que si su línea de centros es paralelo al campo se repelan, según la expresión propuesta por Song<sup>(3)</sup>

$$u_{re/12} = \frac{\rho_0 U_0^2 (a_1 a_2)^2 (3 \cos^2 \theta - 1)}{32 \pi^2 \nu d^4} (a_1 g_{2lr} - a_2 g_{12r}) \quad (4)$$

en donde las funciones  $g$  representan los campos acústicos secundarios.

### Conclusiones teóricas

Estos mecanismos tendrían por finalidad acercar a las partículas entre sí, pero no aseguran un aglomerado estable, asunto aún más crítico en agua dado que casi todas las sustancias en contacto con un medio polar adquieren una carga eléctrica superficial que tiende a repeler a las partículas, y que puede ser mayor que las fuerzas de adhesión tipo Van der Waals. Esta carga eléctrica depende no sólo de los mecanismos que puedan desencadenarse en la interacción sólido-líquido, sino también del proceso de fabricación de la partícula. Existen métodos que eliminan o atenúan la carga de la partícula, pero implican la adición de terceras sustancias que contaminan la suspensión.

### Visualización y estudio experimental del proceso de aglomeración en líquidos

Como parte experimental se mostrará cómo las partículas de TiONa y de Zinc son arrastradas hacia los nodos de presión de un campo ultrasónico estacionario a una frecuencia de 21 kHz. En la figura 3 se presenta el montaje experimental utilizado. Para el caso del Zinc (diámetro medio de partícula en torno a 3-4µm), se observaba una acumulación de partículas en forma de aros próximos a las paredes del tubo. En las imágenes 1, 2 se presentan dos instantáneas del proceso de acumulación del Zinc en los nodos de presión tomadas al cabo de 3-4 segundos, observándose un progresivo aumento de concentración.

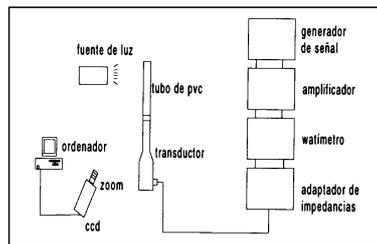
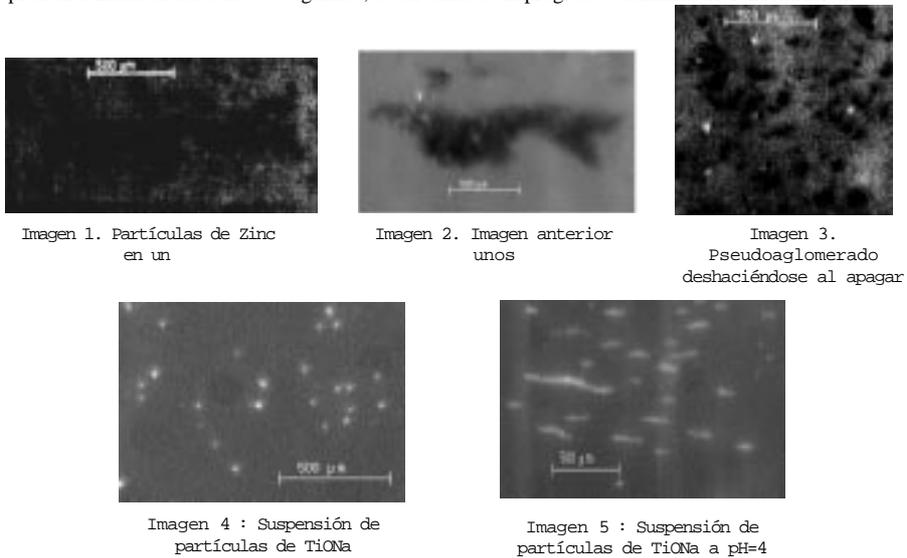


Figura 3. Esquema del dispositivo experimental utilizado para la visualización de partículas.

El "pseudoaglomerado" de Zinc mostrado en las imágenes 1, 2 se mantiene mientras está aplicado el campo acústico, no existiendo fuerzas de adhesión que lo mantengan unido después de apagar el campo,

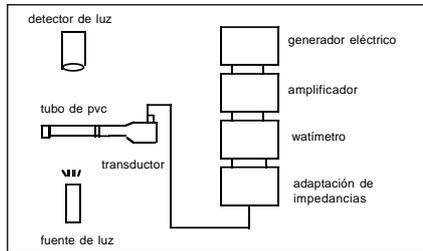


Figura 4. Montaje experimental para detectar cambios de concentración a lo largo del eje del tubo.

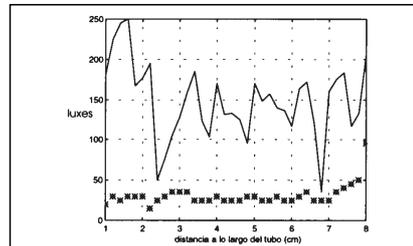


Figura 5. Luz detectada por el fotodetector a lo largo del eje del tubo: en línea continua disolución de Zinc, en línea discreta TiONa

deshaciéndose como se puede observar en la imagen 3.

Con las partículas de TiONa no se observa acumulación de partículas en ninguna región del medio porque estamos manejando partículas de mucho menor tamaño (diámetro medio en torno a  $0.2\mu\text{m}$ ). Bajo estas condiciones la presión de radiación es muy pequeña, apareciendo otros fenómenos que dominan su movimiento. Siguiendo con la cámara CCD el movimiento de las partículas, se puede observar que no sólo no existe una acumulación, sino que tienden a repelerse cuando el campo acústico trata de acercar dos partículas, esta repulsión puede deberse a la existencia de la doble capa eléctrica. En la imagen 4 se observan pequeños núcleos de partículas de TiONa dispersas por todo el medio.

Para atenuar al máximo el efecto de la doble capa eléctrica, se ha añadido HCl hasta conseguir un  $\text{pH}=4$  (próximo al punto isoeléctrico de esta disolución), y tal como se esperaba las partículas no se repelen como antes formándose pequeños aglomerados. El proceso de aglomeración en condiciones isoeléctricas se muestra en la imagen 5. Para cerciorar que no existía acumulación de partículas en ninguna zona se modificó la técnica experimental de visualización (ver figura 4). Ello permitió detectar los cambios de concentración a lo largo del eje longitudinal del tubo de PVC (según la dirección de propagación del campo). La luz láser transmitida se recoge con un fotodetector a lo largo de la dirección de propagación. En la figura 5 se muestran dos gráficas obtenidas con dos suspensiones diluidas : una de Zinc y la otra de TiONa. En ellas vuelve a manifestarse la importancia del tamaño de la partícula. Para el caso el Zinc siempre se forman franjas alternantes cuya separación se corresponde con la semilongitud de onda de la señal ultrasónica generada por el transductor en el tubo. Por el contrario en el caso del TiONa no se forman las franjas, ni aún en el caso de observar aglomeración entre partículas (punto isoeléctrico).

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo en el marco del Proyecto de Investigación del Plan Nacional de I+D AMB96-1211-C02-01 y del Proyecto BRITE-EURAM DELACOU BRPR-CT96-157 de la UE.

#### Bibliografía

1. S. Temkin "Elements of Acoustics" (1981), New York, John Wiley & Sons
2. D. B. Dianov, A. A. Podol'skii and V. I. Turubarov, "Calculation of the hydrodynamic interaction of aerosol particles in a sound field under Oseen flow conditions" (1968) Soviet Physics of Acoustics 13(3) 314-318
3. L. Song "Modeling of acoustic agglomeration of fine aerosol particles" Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University (1990)