

Análisis de la sensibilidad a las vibraciones del método de medición de tensión superficial mediante gota suspendida

M.A. Álvarez Valenzuela, J.A. Díaz García y J.L. Pérez Díaz
Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid,
Avda. Universidad, 30, 28911 Leganés, España,
e-mail: maavalen@ing.uc3m.es, jadgarci@ing.uc3m.es,
jlper@ing.uc3m.es

Recibido el 10 de marzo de 2010; aceptado el 1 de junio de 2010

La medida de la tensión superficial es de gran importancia para numerosos procesos industriales. El método de la gota suspendida es uno de los más extendidos para la medida de la misma y es comúnmente aceptado que es necesario un entorno aislado de vibraciones para poder medir correctamente. Sin embargo hasta el momento no se había realizado un estudio sobre qué nivel de vibraciones es aceptable. En este trabajo se ha determinado experimentalmente la influencia de las vibraciones en la medida de la tensión superficial. Se comprueba la importancia de la presencia de resonancias en el movimiento de la gota y se demuestra que el uso de una bancada antivibratoria compuesta permite reducir en dos órdenes de magnitud la dispersión cuadrática media de la medida de tensión superficial.

Descriptores: Tensión superficial; gota suspendida; vibraciones.

The measurement of the surface tension is of a great importance for a number of industries. The method of the pendant drip or Axisymmetric Drop Shape Analysis is one of the most commonly used. It is assumed that an isolated environment with a small level of vibrations is required for a correct measurement. Indeed, there is not any systematic study on the acceptable level of vibrations. In this paper we have experimentally determined how vibrations affect to the measurement of the surface tension. It is demonstrated how the swinging and oscillating resonances of the drop are of a great importance and how the use of a double antivibration bank can reduce the standard deviation of the measurement of the surface tension in two orders of magnitude.

Keywords: Axisymmetric drop shape analysis; ADSA; vibrations; surface tension.

PACS: 47.55.D-; 68.03.Cd

1. Introducción

La tensión superficial, (γ), definida formalmente como la energía por unidad de superficie presente en una interfaz entre dos fluidos [1], hace que dicha interfaz se comporte como una lamina elástica [2,3] y juega un papel fundamental en multitud de procesos físicos, químicos y biológicos. El conocimiento preciso de la tensión superficial es útil para la optimización de muchas aplicaciones y procesos industriales, tales como la destilación, la absorción y la extracción [4,5]. La variación de su valor mediante detergentes, surfactantes u otros métodos es común en múltiples campos. Su medida precisa es, por consiguiente, de gran interés para un gran número de científicos y técnicos de diversos campos y disciplinas.

Se han descrito muchos métodos para la medición y cálculo de la tensión superficial de los líquidos [6] como, por ejemplo, el método del peso de la gota, el ascenso capilar, el método del anillo du Nouy, la placa de Wilhelmy y el de la gota suspendida, entre otros. El método de la gota suspendida es uno de los más utilizados por su versatilidad. Fue sugerido por Worthington [7,8] y Ferguson [9] está basado en la medición del contorno de la gota colgante. Andreas *et al.* [10] lo optimizaron integrando la ecuación de equilibrio mecánico para dos fluidos homogéneos separados por una interfaz o ecuación de Young–Laplace [11,12] obteniendo una forma de gota teórica. Esta gota teórica es comparada con la forma de gota experimental. Fordham [13] tabuló la relación de

los radios de la gota en diferentes posiciones. Este método es llamado el método de los planos seleccionados.

En la actualidad existen varios tipos de análisis de gotas con simetría axial o ADSA (Axisymmetric Drop Shape Analysis), siendo una técnica eficaz para la medición de propiedades en la interfaz de la gota. Del Rio y colaboradores [14,15,16] desarrollaron la segunda generación de ADSA, usando como parámetros de optimización la curvatura en el vértice, en vez del radio de curvatura y el ángulo de alineación vertical. También desarrollo un nuevo algoritmo de análisis llamado ALFI (Axisymmetric Liquid–Fluid Interfaz). Horfar *et al.*, [17] demostraron que el método ADSA sólo es aplicable para números de Bond aproximadamente $\beta \approx 0.2$; estando esta limitación relacionada con la presencia de un punto de inflexión en el área del cuello. Para gotas cercanas a la forma esférica el método ADSA no sería aplicable.

El parámetro de forma o número de Bond, β , viene definido por

$$\beta = \frac{\Delta\rho g R_0^2}{\gamma}, \quad (1)$$

donde R_0 es el tamaño característico de la gota, $\Delta\rho$ es la diferencia de densidades entre los dos fluidos y es la aceleración de la gravedad. La relación entre la tensión superficial y la diferencia de presiones en una interfaz curva viene dada por

$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P, \quad (2)$$

donde R_1 y R_2 son los dos radios principales de la curvatura de la interfaz y ΔP es la diferencia de presiones en la interfaz. Cuando no se encuentra afectada por ninguna fuerza externa aparte de la gravedad, se puede expresar como una dependencia lineal con respecto a la altura, z , del plano de referencia:

$$\Delta P = \Delta P_0 + (\Delta p)gz, \quad (3)$$

donde ΔP_0 es la diferencia de presión en un plano de referencia. Así, para un determinado valor de γ , la forma de una gota queda determinada [14] y viceversa.

El método ADSA se ve afectado por diversas perturbaciones que afectan a las gotas suspendidas, siendo una de las más importantes las vibraciones del soporte. Este tipo de perturbaciones pueden llegar a afectar gravemente la estabilidad de la gota y modificar la interfaz. Después de que Lord Rayleigh [18] desarrollara un estudio de la dinámica de gotas libres, J. Hoon Moon y B. Kang [19] mostraron que una gota suspendida sobre un sólido tiene dos modos de vibración básica: un modo de vibración longitudinal a la gota [20-24] y un modo de oscilación a una frecuencia más baja que la del modo longitudinal [19]. A pesar de los estudios realizados sobre los modos de vibración de la gota suspendida, nunca se ha estudiado su influencia en la medida de la tensión superficial.

En este trabajo hemos medido la tensión superficial y el volumen de una gota mediante ADSA en tres ambientes vibro-acústicos diferentes. Comparando los resultados puede comprobarse una gran influencia de la vibración y el ruido sobre el método ADSA, especialmente cuando se hace resonar los modos de vibración de la gota.

2. Procedimiento experimental

Se efectuaron las mediciones de tensión superficial y volumen de una gota suspendida de agua mediante ADSA en tres ambientes vibro-acústicos distintos sin variar ninguna otra variable, especialmente temperatura y porcentaje de humedad relativa. En estos experimentos se cuidó mantener el número de Bond entre 0.229 y 0.223. En la Fig. 1 se presenta un esquema simple del análisis ADSA realizado en las pruebas, donde básicamente parte de la captura de una imagen de alta calidad que describe el perfil de la gota (perfil experimental). Ésta es luego transmitida a un ordenador que ajusta las series laplacianas conocidas con valores de tensión superficial igualmente conocidos. El mejor ajuste identificara las propiedades interfaciales del fluido estudiado.

En nuestro trabajo se utilizó un equipo óptico para la cálculo de la tensión superficial KSV instrument ltd. CAM101, cuyo esquema se muestra en la Fig. 2, con una fuente de luz de fondo LED ultra rojo, modelo DLC2-6SRD de 20 mm, una cámara monocromática con dispositivo de carga acoplada CCD con interfaz FireWire modelo A FWCAM V M y óptica GOYO GMT35018MCN de 50 mm/1.8 2/3" con extensión de 30 mm, una jeringuilla dispensadora manual Hamilton de 1ml y su respectivo capilar, un ordenador con el software KSV CAM versión 4.0.1 de 32 bits para el

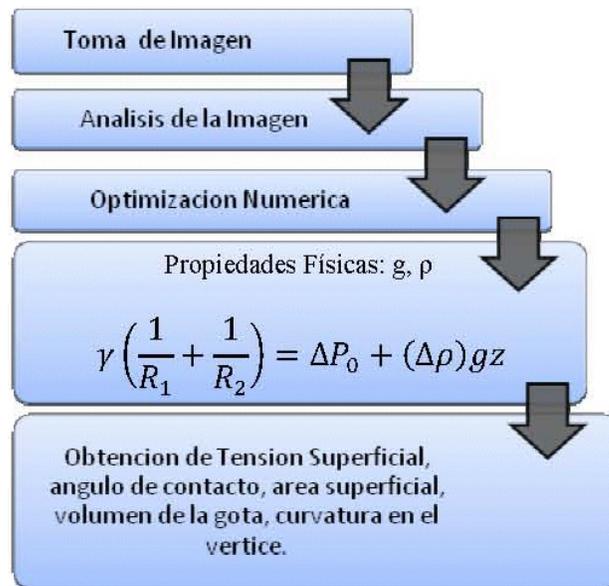


FIGURA 1. Esquema de análisis ADSA.

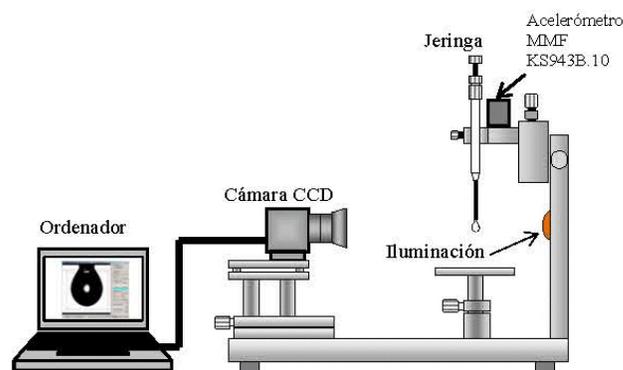


FIGURA 2. Sistema de medición de gota colgante.

procesamiento de la imagen. Este sistema presenta intervalos de medición de 0.01-999 mN/m en las medidas de la tensión superficial, con una precisión según el fabricante de ± 0.01 mN/m, con intervalos de fotogramas desde 33 ms a 1000 s y capaz de realizar 30 imágenes completas por segundo.

El equipo se calibró empleando una esfera de carburo de tungsteno calibrada de $4000 \pm 1 \mu\text{m}$ de radio, con certificado de calibración N° 7202390 Ultra Prazision Messezeuge GMBH.

El fluido utilizado para las medición es agua desionizada incolora e inodora, con una densidad a $20.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ de 1.000 ± 0.005 g/ml (UNE 26-389), con una alcalinidad PH de 6-7.5 (UNE 26-390), con conductividad eléctrica inferior a $800 \mu\text{S/m}$.

Todas las pruebas fueron realizadas en una cámara climática en la que se mantuvo una temperatura controlada de $20.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$, una humedad del $32 \pm 1\%$, una presión atmosférica de 93.50 ± 0.1 KPa, el valor de la gravedad conoci-

do por mediciones previas es de $9.8 \pm 0.001 \text{ m/s}^2$. La adquisición de las imágenes fue realizada a 48 cuadros por segundo.

Para la medida de las vibraciones en la base del equipo de medición se empleó un acelerómetro fijado al pedestal que sujeta la jeringa. Se empleó un acelerómetro piezoeléctrico triaxial MMF modelo KS943B.10, con un ancho de banda de 0.3 a 19000 Hz y un equivalente de salida de $10 \text{ mV/g} \pm 5 \%$, un amplificador MMF M32 de un canal, con un ancho de banda de 0.3 KHz, una tarjeta digitalizadora Keithley KUSB-3100, con una frecuencia de muestreo máxima de 1 MHz por canal, y finalmente un ordenador con el software TestPoint® instalado para la adquisición de datos y pruebas.

Para conseguir los tres ambientes vibro-acústicos se emplearon diferentes soportes para sustentar el equipo de medición (Fig. 3). Así, el primer ambiente vibro-acústico es propiamente el existente en la cámara ubicada en el laboratorio del departamento de ingeniería mecánica de la universidad Carlos III de Madrid. Corresponde a la planta baja de un edificio con estructura de hormigón armado en el que hay un aparcamiento en la planta sótano y que no tiene ningún tipo de sistema de reducción de vibraciones. El espectro de vibración de 0 a 300 Hz de la base del equipo cuando se encuentra en dicho ambiente se muestra en la Fig. 4a. Se trata de un ruido blanco en esta banda de 0 a 300 Hz con un valor medio de la aceleración en torno de $2 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

El segundo ambiente resulta de filtrar las vibraciones del primer ambiente mediante una bancada amortiguadora de una sola etapa, consistente en una placa de aluminio de 2.0 mm de espesor de $400 \times 200 \text{ mm}$ soportada mediante cuatro amortiguadores marca Paulstra serie Evidgom. El espectro de frecuencias medido entonces en el equipo se muestra en la Fig. 4B donde puede verse que el nivel medio de vibraciones de tipo blanco baja hasta aproximadamente $5 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ esto es unos 20 dB pero permanecen picos de acoplamiento acústico blanco con aparatos eléctricos (por ejemplo ventiladores del laboratorio) muy evidentes a 50 y 150 Hz. Podemos decir que el ambiente 2 conseguido con una etapa de amortiguamiento, presenta una menor perturbación de vibraciones es espectro ancho pero sin embargo quedan evidentes picos a 50, 150 y 250 Hz probablemente generados por aparatos eléctricos.

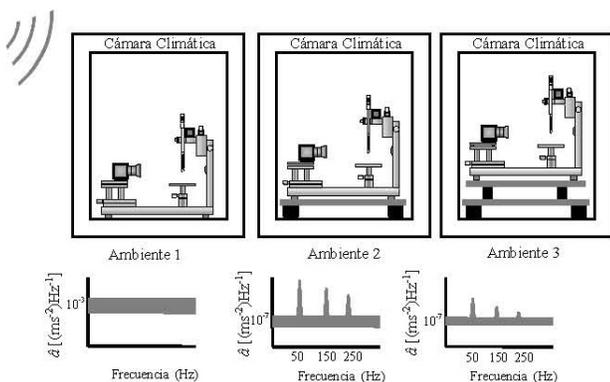


FIGURA 3. Esquema de ambiente vibro-acústico.

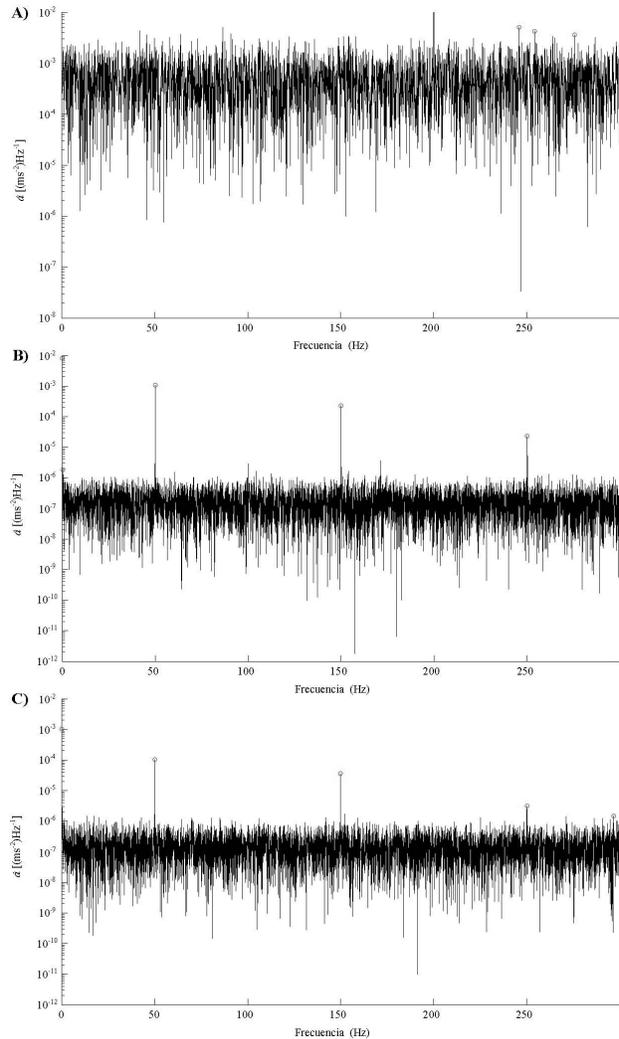


FIGURA 4. Transformada rápida de Fourier de la aceleración medida del soporte de la jeringa. A) Primer ambiente vibro-acústico, B) Segundo ambiente vibro-acústico y C) Tercer ambiente vibro-acústico.

El tercer ambiente se consigue empleando una bancada compuesta esta vez de dos etapas de amortiguación. Esta bancada consiste en situar la anterior bancada simple sobre otra bancada compuesta de otra placa similar pero soportada por amortiguadores de gel marca $\alpha\text{GEL}^{\text{TM}}$ de tipo MN3. El espectro de vibraciones se muestra en la Fig. 4c. Puede comprobarse como, además de reducir los niveles de ruido de amplio espectro, también reduce en 4 dB los picos de acoplamiento electromecánicos presentes en el segundo ambiente. Para todos los casos se generó una gota suspendida de agua pura desionizada, de volumen inicial $12.49 \pm 0.04 \text{ mm}^3$. Este volumen va disminuyendo por evaporación durante la evolución en el tiempo de la gota.

La reducción de nivel de vibración es claramente diferente para la parte de banda ancha (ruido blanco) que para los picos. Así, mientras una bancada de una sola etapa reduce la parte blanca en unos 20 dB, los picos monocromáticos se reducen en tan sólo 12 dB. La reducción en el caso de una

doble etapa (ambiente 3) es también de 20 dB para la parte blanca pero de 16 dB para los picos monocromáticos.

3. Resultados y discusión

En la Fig. 5 se muestran los resultados obtenidos de la tensión superficial y el volumen de la gota en función del tiempo por los tres ambientes anteriormente expuestos. Se observa claramente en la medida de tensión superficial y la del volumen, las oscilaciones pronunciadas que presentan en el ambiente 1. En el ambiente 2 la tensión superficial se estabiliza apreciablemente así como lo hace el volumen, finalmente en el ambiente 3 se produce la máxima estabilización. El volumen de la gota va reduciéndose gradualmente con el tiempo debido a la evaporación. Esta reducción de volumen hace que cambie la frecuencia de resonancia de la gota. Es claro que, según se evapore la gota y ésta vaya cambiando su frecuencia de resonancia, existirán unas frecuencias en que coincidan con los picos de vibración (especialmente en los ambientes 1 y 2).

Se puede observar, especialmente en el ambiente 2 en el que las vibraciones son principalmente monocromáticas (50

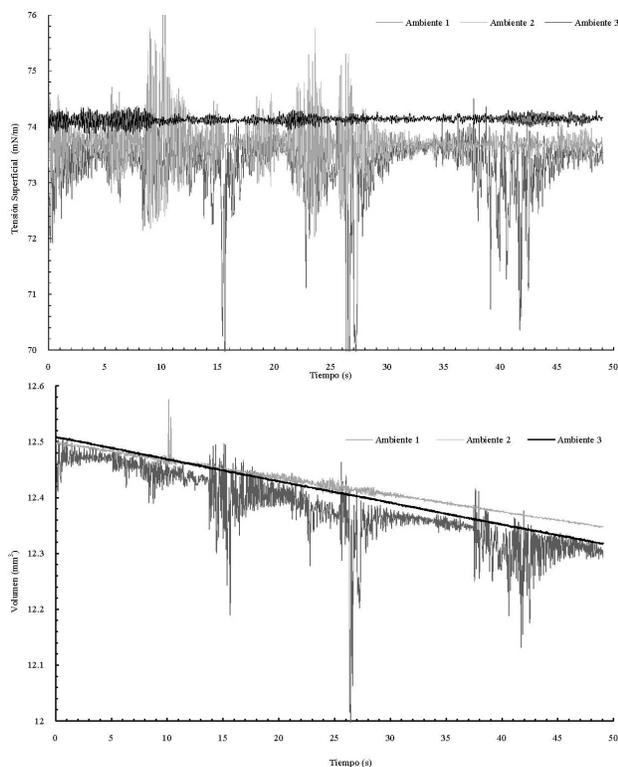


FIGURA 5. Tensión Superficial y Volumen de la Gota Suspendeda en función del Tiempo, para los tres ambientes vibro-acústicos.

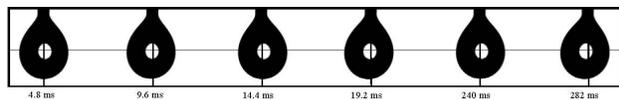


FIGURA 6. Secuencia de imágenes de una gota colgante afectada por las vibraciones.

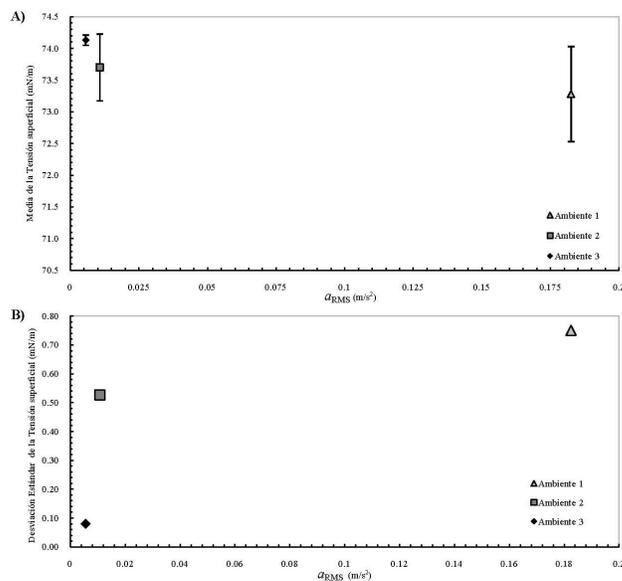


FIGURA 7. Relación de la media y la desviación estándar de la tensión superficial con el valor eficaz de la aceleración (a_{RMS}) para los tres niveles vibratoriales.

y 150 Hz), cómo la gota entra en resonancia (afectando directamente a la medida) cuando su masa es tal que su modo propio de vibración coincide con 50 o con 150 Hz. En la Fig. 6 se muestra una secuencia de imágenes típicas de la gota cuando ésta resuena en su modo de vibración.

En la Fig. 7a se exponen los resultados de las medias de tensión superficial en los tres ambientes respecto de la aceleración cuadrática media a_{RMS} medida en el soporte de la jeringa. En la Fig. 7b se muestra la dispersión cuadrática media de la tensión superficial en cada ambiente con respecto, también, a la aceleración cuadrática media a_{RMS} . Por tanto, un menor valor de a_{RMS} conlleva una menor dispersión cuadrática media de la tensión superficial. Sin embargo, al pasar del ambiente 2 al ambiente 3, que no implica un importante cambio en términos de a_{RMS} , se produce una reducción de la dispersión cuadrática media de la medida. De la Fig. 7 se deduce que solamente en el ambiente 3 se eliminan las grandes oscilaciones en las medidas tanto de volumen como de tensión superficial. Esto se traduce en un valor de la dispersión cuadrática media de un orden de magnitud menor.

A la vista de esto es claro que tanto la exactitud como la precisión mejoran poco al pasar del ambiente 1 al ambiente 2, mientras que la mejora es muy significativa al pasar al ambiente 3.

Cabe interpretar que durante el proceso de medida AD-SA la gota va perdiendo masa por evaporación, su frecuencia propia de resonancia varía y, si en el ambiente encuentra excitaciones vibratorias monocromáticas, se producirán vibraciones que afectan tanto a la exactitud como a la precisión. La regla práctica que puede desprenderse del presente trabajo es que se recomienda altamente la instalación de una doble etapa amortiguadora, mientras que instalar una sola no tiene ningún interés.

4. Conclusiones

Las vibraciones afectan tanto a la exactitud como a la precisión de la medida de la tensión superficial en el método de la gota suspendida con análisis ADSA, principalmente por la inducción resonante de los modos de vibración de la gota. Una disminución drástica de las vibraciones en general reduce solamente algo la dispersión cuadrática media si se mantienen excitaciones de resonancia. Sin embargo, la reducción de los niveles de vibración monocromáticos reduce finalmente en gran manera la dispersión cuadrática media.

En el método ADSA prolongar la duración de las pruebas experimentales no reduce la dispersión cuadrática media.

Para reducirla es imprescindible eliminar la vibración resonante de la gota. Esto puede conseguirse con una bancada anti-vibratoria compuesta de dos etapas que es capaz de reducir de 0.1825 a 0.0056 mN/m la desviación estándar de la tensión superficial.

La bancada antivibratoria compuesta ofrece a la vista de los resultados obtenidos, una manera sencilla de amortiguamiento aceptable para evitar que las perturbaciones mecánicas habituales en un entorno de laboratorio desvirtúen los resultados que de tensión superficial se puedan obtener con instrumentos ADSA.

-
1. Fay de Raymond, *Étude Thermodynamique de la Tension Superficielle* (Paris, Gauthier - Villars & C, 1934) p. 3.
 2. H.Y. Erbil, en: K.S. Birdi (Ed.) *Handbook of Surface and Colloid Chemistry* (New York: CRC, Press, LCC, 1997) Cap. 9.
 3. H. Butt, K. Graf y M. Kappl, *Physics and Chemistry of Interfaces*. (Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co, 2003).
 4. K. Ali, Anwar-ul-Haq, B. Salma y S. Siddiqi, *Colloids Surf. A* **272** (2004) 161.
 5. A.J. Queimada, I.M. Marrucho, E.H. Stenby y J.A.P. Coutinho, *Fluid Phase Equilib.* **222** (2004) 161.
 6. A.W. Adamson y A.P. Gast, *Physical Chemistry of Surfaces* Sixth Edition. (Los Angeles, California, John Wiley & Sons, Inc., 1997).
 7. A.M. Worthington, *Proc. R. Soc. Lond.* **32** (1881) 362.
 8. A.M. Worthington, *Philos. Mag.* **19** (1885) 43.
 9. A. Ferguson, *Philos. Mag.* **23** (1912) 417.
 10. J.M. Andreas, E.A. Hauser y W.B. Tucker. *J. Phys. Chem.* (1938) **42** 1001.
 11. T. Young, *Phil. Trans. R. Soc. Lond* **95** (1805) 65.
 12. P.S. Laplace, *Traité de Mécanique Céleste* (Paris, Gauthier Villars, 1805).
 13. S. Fordham, *Proc. R. Soc. London Ser. A Math. Phys. Sci.* (1948) **194** 1.
 14. S. Lahooti, O.I. del Río, P. Cheng y A.W. Neumann, *Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA)* ed. Spelt JK Neumann (AW. New York : Marcel Dekker Inc 1996) pp. 10.
 15. O.I. del Río, *On the Generalization of Axisymmetric Drop Shape Analysis* (University of Toronto, 1993).
 16. O.I. del Río y A.W. Neumann, *J. Colloid Interface Sci.* (1997) **196** 136.
 17. M. Hoorfar y A.W. Neumann, *Advances in Colloid and Interface Science* (2006) **121** 25.
 18. Rayleigh, Lord, *Pros. R. Sot. London Ser. A* **29** (1879) 71.
 19. J. Hoon Moon y B. Ha Kang, *Physics of Fluids* **18** (2006).
 20. H.-Y. Kim, *Phys. Fluids* **16** (2004) 474.
 21. D.W. DePaoli, J.Q. Feng, O.A. Basaran y T.C. Scott, *Phys. Fluids* **7** (1995) 1181.
 22. T. Tsukada, M. Sato, N. Imaishi, M. Hozawa y K. Fujinawa, *J. Chem. Eng. Jpn.* **20** (1987) 88.
 23. D.W. DePaoli y O.A. Basaran, *Phys. Fluids* **6** (1994) 2923.
 24. O.A. Basaran y E.D. Wilkes, *Phys. Fluids* **9** (1997) 1512.