

Análisis del Campo de Flujo alrededor de Esferas en Fluidos Viscoelásticos

Raúl Montiel^{1*}, Arturo Mendoza² y Octavio Manero³.

^{1*} Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I) - luar@xanum.uam.mx;

² Facultad de Química (UNAM) - arturojmf@yahoo.com.mx

³ Instituto de Investigación en Materiales (IIM-UNAM) - manero@servidor.unam.mx

Introducción

El entendimiento de los mecanismos físicos de los diversos fenómenos que se presentan en el flujo de fluidos viscoelásticos es de vital importancia para la predicción y diseño de procesos industriales. No obstante, la determinación de los parámetros de flujo críticos que originan estos fenómenos continúa siendo un problema por resolver.

Un problema abierto en reología consiste en la determinación de la fuerza de arrastre de una partícula en movimiento a través de un fluido viscoelástico. La fuerza de arrastre, o equivalentemente la velocidad de sedimentación, ha atraído mucha atención en los últimos años, particularmente porque la determinación de la fuerza de arrastre sirve como prueba de validación de numerosos métodos numéricos y ecuaciones constitutivas. Por lo tanto, son necesarios resultados experimentales confiables para poder validar los resultados numéricos. Aunque el problema de sedimentación de esferas ha sido estudiado durante más de dos décadas, actualmente, existen varios fenómenos que no se han estudiado con detalle y que continúan siendo un problema por resolver.

La cauda negativa es una respuesta viscoelástica del fluido que consiste de una región de recirculación en la parte posterior de la esfera en dirección contraria al movimiento de la esfera. Sigli y Coutanceau [1] encontraron experimentalmente la existencia de un sobre aumento de la velocidad del fluido en esta región, en soluciones viscoelásticas adelgazantes de óxido de polietileno. Usando técnicas de visualización de flujo empleando la técnica de PIV, se puede observar que en la inmediata vecindad de la esfera, el fluido se mueve en la misma dirección que la esfera, sin embargo, a distancias más alejadas, el fluido se mueve en dirección contraria. Hasssager [2], posteriormente, nombró este fenómeno como “cauda negativa”. Los resultados muestran que las caudas negativas solo se desarrollan en los fluidos que presentan características elásticas y adelgazantes. Adicionalmente, la formación de la cauda negativa dependía de que se excediera cierto valor crítico del número de elasticidad, definido por el cociente del número de Weissenberg entre el número de Reynolds, $E=We/Re$.

De igual manera Jin [3] y Zheng [4] validaron la evidencia experimental de que tanto propiedades adelgazantes como elásticas, particularmente una viscosidad extensional creciente, son necesarias para la formación de la cauda negativa. Sin embargo, McKinley et al. [5] y Satrape y Crochet [6] realizaron experimentos y simulaciones detalladas para un fluido de Boger respectivamente. En el primer caso, se utilizó una geometría cilíndrica, observándose la formación de la cauda negativa justo en el punto en que ocurre una inestabilidad en el flujo; mientras que en el segundo, la formación de la cauda negativa se encuentra íntimamente ligada con el parámetro de extensibilidad del fluido en cuestión.

La formación de la cauda negativa se relaciona a casos donde la elasticidad en el fluido es ligeramente mayor al aumento en la viscosidad extensional. No obstante, Harlen [7] propuso un segundo mecanismo de formación de la cauda negativa. Este incluye la aparición de una fuerza de competencia entre la magnitud de los esfuerzos elongacionales y los de corte en la zona de la cauda, los cuales producen una fuerza

elástica de enredamiento de los mismos en una dirección axial diferente a la de la esfera que ocasionan que en la vecindad el fluido sea jalado en dirección contraria al movimiento de la esfera. Adicionalmente, bajo estas circunstancias, Harlen encuentra que la región de estancamiento se mueve en dirección de la esfera a medida que el número de Weissenberg aumenta. Siguiendo las ideas de Bush y Harlen, Arigo y McKinley [8] proponen dos criterios para la formación de una cauda negativa:

$$\frac{N_1}{\Delta\tau_{ext}} \approx \frac{\left(\Psi_1\left(\dot{\gamma}\right)/2\eta_0\right)\dot{\gamma}}{\eta_e\left(\dot{\varepsilon}\right)/\eta_0} \propto \frac{De\left(\dot{\gamma}\right)}{Tr} \quad (1)$$

donde $N_1 = (\tau_{xx} - \tau_{yy}) = \Psi_1\left(\dot{\gamma}\right)\dot{\gamma}^2$ es la primera diferencia de esfuerzos normales en corte simple, y $\Delta\tau_{ext} = (\tau_{zz} - \tau_{rr}) = \eta_e\left(\dot{\varepsilon}\right)\dot{\varepsilon}$ es la diferencia de esfuerzos normales en

extensión uniaxial. De acuerdo a este criterio, Arigo y Mc Kinley proponen que un valor grande de la relación $N_1/\Delta\tau_{ext}$ da lugar a la formación de una cauda negativa. Utilizando el argumento de Harlen, Arigo y Mc Kinley muestran observaciones experimentales en donde las variaciones radiales de la velocidad escalan con el radio de la esfera, mientras que las variaciones de la velocidad axial escalan con una longitud mayor proporcional al radio del cilindro R. Obteniéndose el segundo criterio para la formación de la cauda negativa:

$$\left(\frac{\Delta\tau_{ext}}{\tau_{yx}}\right)\left(\frac{a}{R}\right) = \frac{\eta_e\left(\dot{\varepsilon}\right)\dot{\varepsilon}}{\eta\left(\dot{\gamma}\right)\dot{\gamma}}\left(\frac{a}{R}\right) < C \quad (2)$$

donde C es una constante cuyo valor depende de la cinemática de flujo. Los dos indican que el sobre aumento de la velocidad por arriba del valor newtoniano está promovido por una viscosidad extensional pequeña. No obstante, haciendo un análisis de los criterios anteriores para la formación de una cauda negativa utilizando los modelos de Phan-Thien-Tanner y FENE-CR, Phan-Thien[9,10] encontró que los criterios encontrados por Mckinley no son validos a medida que aumenta el número de Weissenberg . Es decir, que a partir del criterio de la ecuación (1) y la ecuación (2), la presencia de un coeficiente de esfuerzos normales y una viscosidad adelgazantes respectivamente, se retrasa la formación de una cauda negativa. Por lo que de las dos relaciones anteriores se puede decir que las propiedades de adelgazamiento de los fluidos debilitan la formación de la cauda negativa. Se ha demostrado que el criterio de la ecuación (1) es valido solamente cuando el valor de la velocidad en la zona de la cauda se encuentra por arriba del valor newtoniano en ambos modelos. El criterio de la ecuación (2) aplica únicamente cuando se mantiene un número de Deborah fijo.

El presente trabajo esta enfocado a un estudio experimental de la cinemática de flujo en estado estacionario que se desarrolla en la zona de la cauda de una esfera que sedimenta en un polímero asociativo. De manera particular, en la estructura y desarrollo de la cauda negativa estudiando el factor de corrección de la velocidad por efectos de pared y de la formación de caudas negativas para encontrar un número de Weissenberg crítico en el que los efectos elongacionales se vean aumentados de tal manera que ocurra un aumento en el factor de corrección de la velocidad. Una vez encontrado el número de Weissenberg crítico, el criterio de formación de la cauda negativa dependerá del

momento en que la respuesta elongacional del fluido sea menor que la respuesta elástica, se evalúa este criterio a través de la relación: $We / (N1_{ext} / N1_c)$.

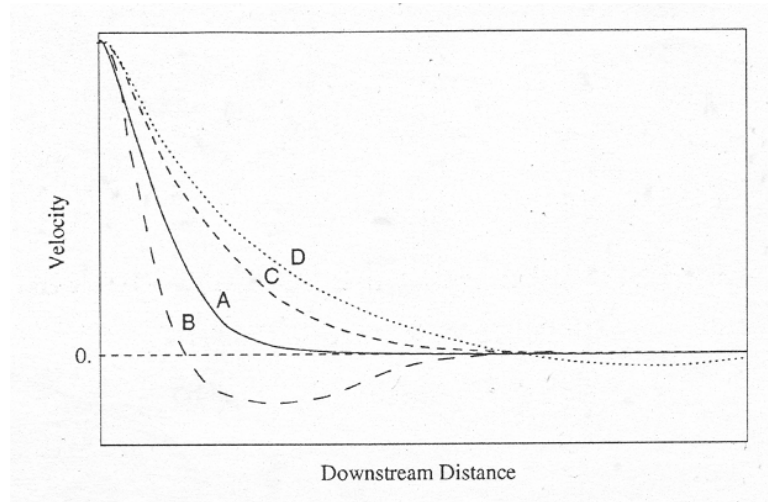


Figura 1.- Esquema cualitativo general del comportamiento de la velocidad del fluido en la parte posterior de la esfera

Sección Experimental

1.- Equipo de Sedimentación

Para el desarrollo de los experimentos, se diseñó y construyó el siguiente equipo de sedimentación con un mecanismo de liberación de esferas que permita la liberación de esferas de diferentes materiales para, de esta forma, poder variar el número de Weissenberg en los diferentes experimentos [11]

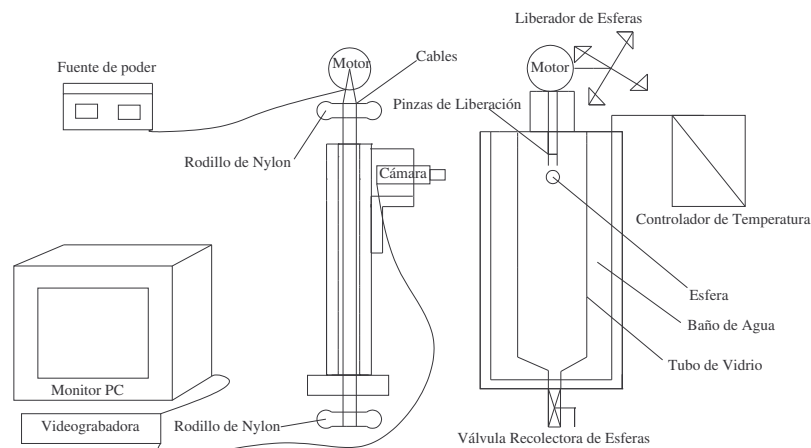


Figura 2.- Dispositivo Experimental

El dispositivo experimental consta de un tubo de vidrio cilíndrico de 120 cm de longitud y 12.7 cm de diámetro interno en el cual se encuentra contenido el fluido en el que se hacen descender las esferas. El tubo cilíndrico se encuentra dentro de un tanque rectangular de vidrio de 150 cm de altura y 20.5 cm de longitud en sus otras caras. El tanque contiene un fluido (H_2O) con un índice de refracción muy similar al del material de construcción del tanque (vidrio) para eliminar los efectos de refracción en la superficie curva de la interfase cilindro-agua. Así mismo, en el tanque se encuentra

incluido un sistema controlador de temperatura. Este sistema externo sirve también para minimizar las fluctuaciones en la temperatura ambiental.

2.- Preparación de fluidos

El fluido asociativo se prepara mezclando un cierto volumen de Hase (emulsión soluble de álcalis hidrofóbicamente modificada) al 30% en peso en agua desionizada para obtener una concentración determinada en peso de la solución final. Para garantizar que la viscosidad de la solución se mantenga estable, se utiliza una disolución de AMP (2-amino-2 metil-1-propanol) 1M. Posteriormente se realiza una agitación mecánica suave de la mezcla para evitar una degradación de las cadenas del polímero. Una vez finalizado el proceso de agitación, se deja reposar el fluido durante 24 h y se repite una vez más el proceso de agitación y reposo durante 2 o 3 días más hasta alcanzar la homogenización de la mezcla. [12,13].

Resultados

Las predicciones de los resultados del modelo para la viscosidad en flujo cortante simple y para la primera diferencia de esfuerzos normales se presentan en figuras 3 y 4.

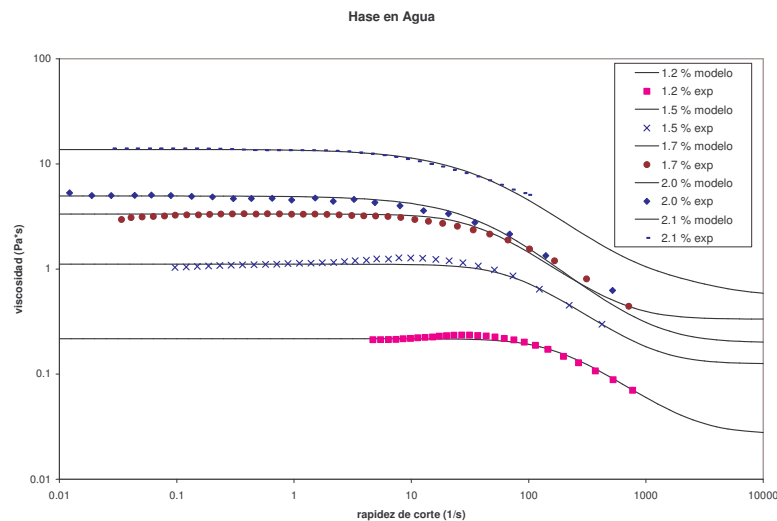


Figura 3.- Predicción del modelo de Bautista-Manero para la viscosidad de corte

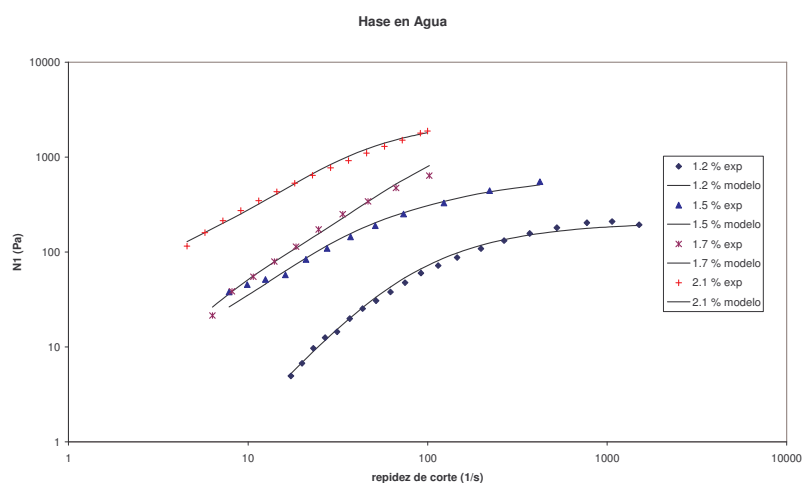


Figura 4.- Predicciones del modelo de Bautista-Manero para la primera diferencia de esfuerzos normales

Conclusiones

Como se puede observar en las gráficas anteriores, las predicciones del modelo de Bautista-Manero son muy buenas, lo cual nos permite obtener parámetros confiables de nuestro criterio de formación de la cauda negativa como son: We , el número de Weissenberg, N_{1c} y primera diferencia de esfuerzos normales en corte, sin embargo, existe un parámetro restante, la primera diferencia de esfuerzos normales en extensión, que será obtenido a través del modelo de Boek-Pearson.

Referencias

- 1.- D. Sigli, M. Coutanceau; "Effect of finite boundaries on the slow laminar isothermal flow of a viscoelastic fluid around a spherical obstacle". **J. Non-Newt. Fluid Mech.** vol 2 (1977) 1-21.
- 2.-O. Hassager; "Negative wake behind bubbles in non-Newtonian liquids". *Nature* 29, 402-403.
- 3.-H. Jin, Phan-Thien N, Tanner RI; "A Finite element analysis of the flow past a sphere in a cylindrical tube: PTT fluid model", **Comp Mech** 8;409-422
- 4.- R. Zheng, N. Phan-Thien, R.I. Tanner; "The flow past a sphere in a cylindrical tube: effects of inertia, shear-thinning and elasticity", **Rheologica Acta** 30 (1991) 499-510.
- 5.-G.H. McKinley, R.C. Armstrong, R.A. Brown; "The wake instability in viscoelastic flow past confined circular cylinders". **Phil. Trans. R. Soc. London** 344 (1993) 265-301.
- 6.-J.V. Satrape, M.J. Crochet; "Numerical simulation of the motion of a sphere in a boger fluid". **J. Non-Newt. Fluid Mech**, 55 (1994) 91-111.
- 7.- Oliver G. Harlen; "The negative wake generation behind a sphere sedimenting through a viscoelastic fluid". **J. Non-Newt. Fluid Mech**, 108 (2002) 411-430.
- 8.- M.T. Arigo, G.H. McKinley; "An experimental investigation of negative wakes behind spheres settling in a shear-thinning viscoelastic fluid". **Rheologica Acta**. 37 (1998) 307-327.
- 9.-Hua-Shu Dou, Nhan Phan-Thien; "Negative wake in the uniform flow past a cylinder". **Rheologica Acta**, 42 (2003) 383-409.
- 10.- Hua-Shu Dou, Nhan Phan-Thien; "Criteria of negative wake generation behind a cylinder" **Rheologica Acta**, 43 (2004) 203-209.
- 11.- Mendoza Fuentes Arturo de Jesús; "Diseño, construcción y aplicación de un equipo de asentamiento de partículas en un polímero asociativo" Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2005
- 12.-Caram Salas Yenin; "Comportamiento reológico de polímeros asociativos y sus propiedades de superficie". Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.
- 13.-Soto Castruita Enrique; "Estudio reológico de disoluciones de polímeros asociativos", Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.