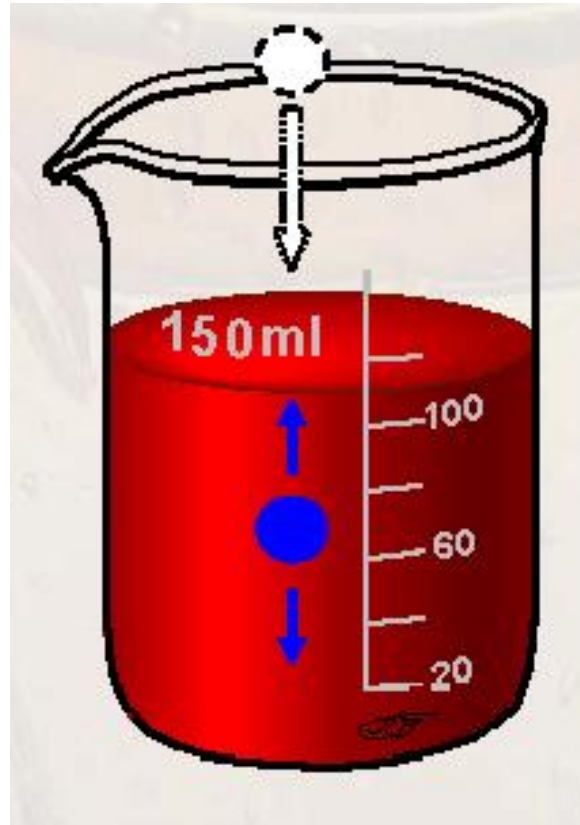


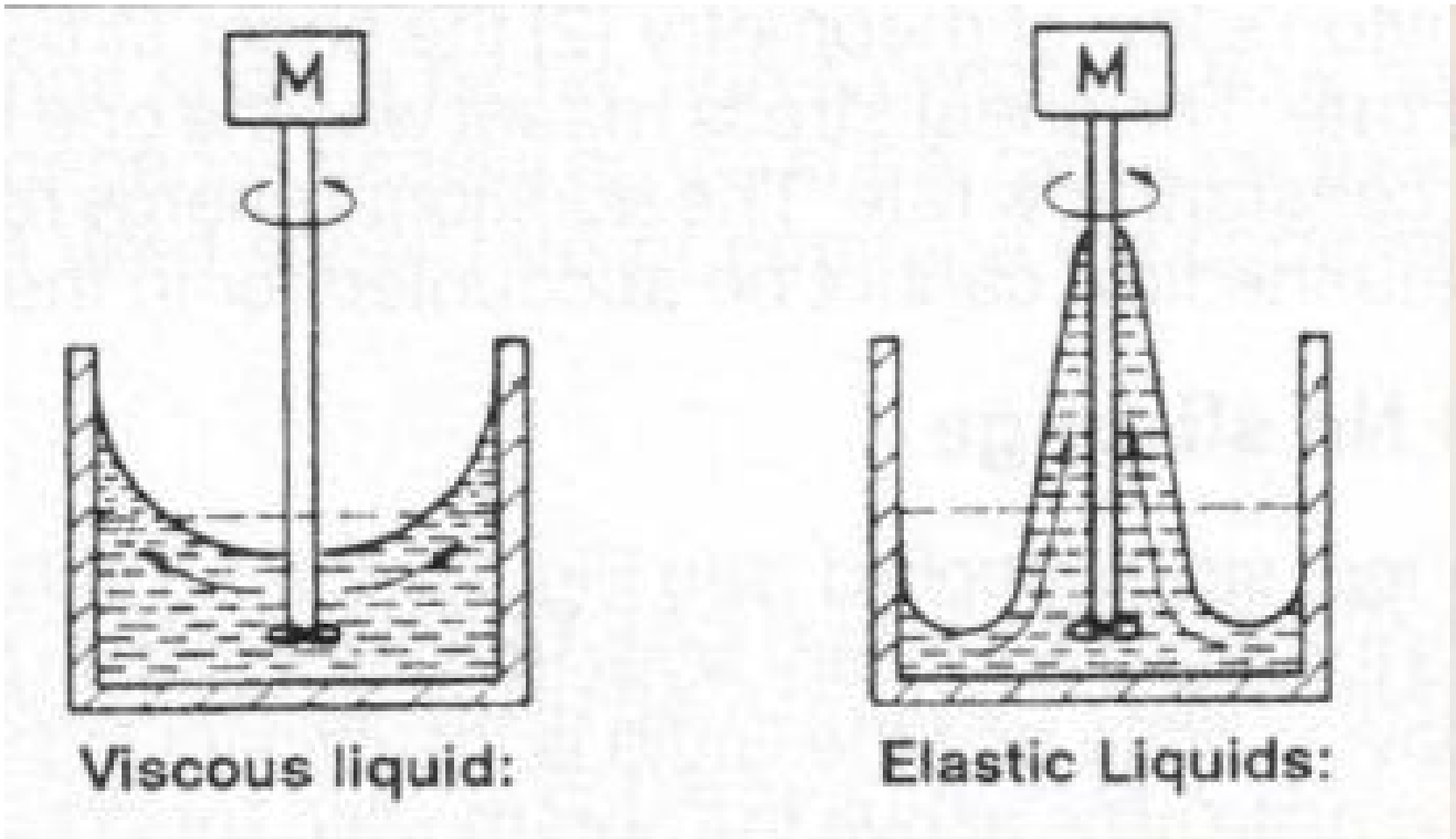
Interacciones entre partículas en fluidos viscoelásticos

Fluidos viscoelásticos

Propiedades elásticas y viscosas



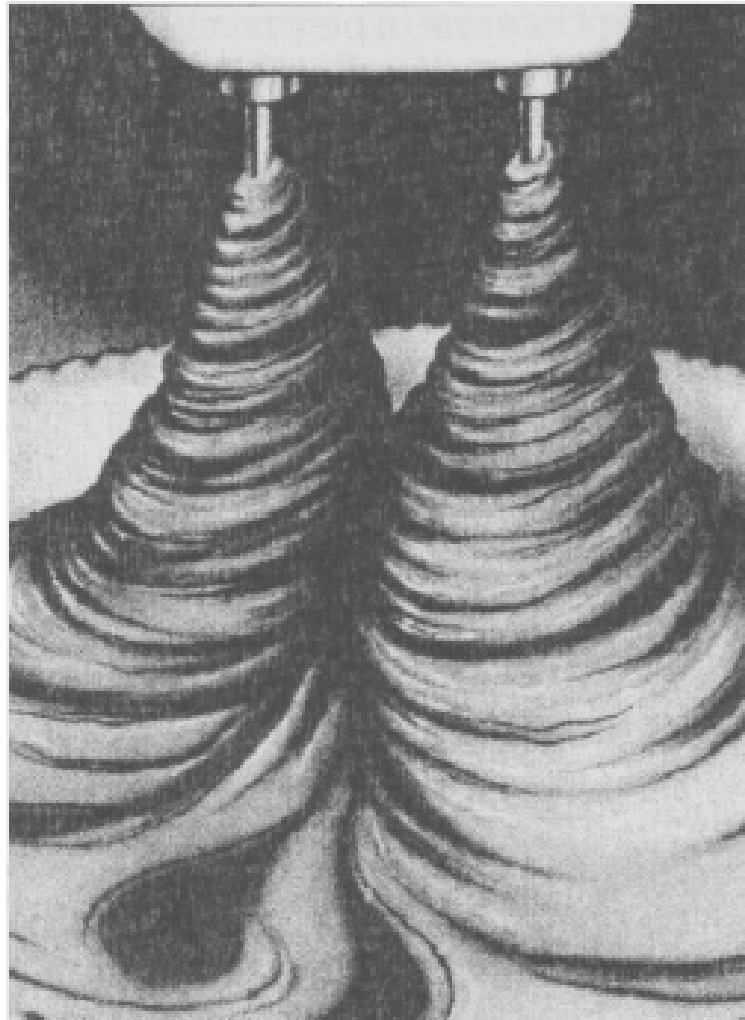
Fluidos viscoelásticos



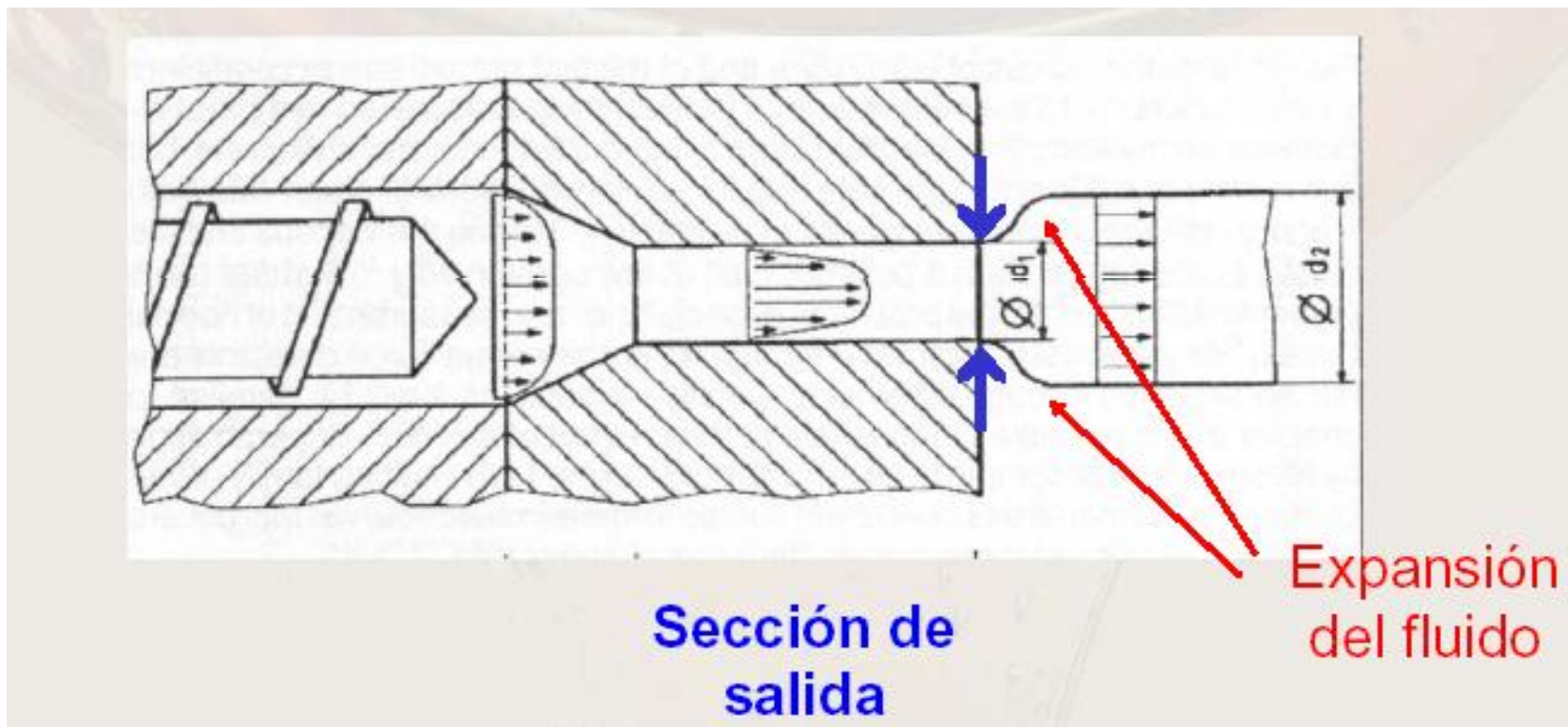
Efecto Weissenberg



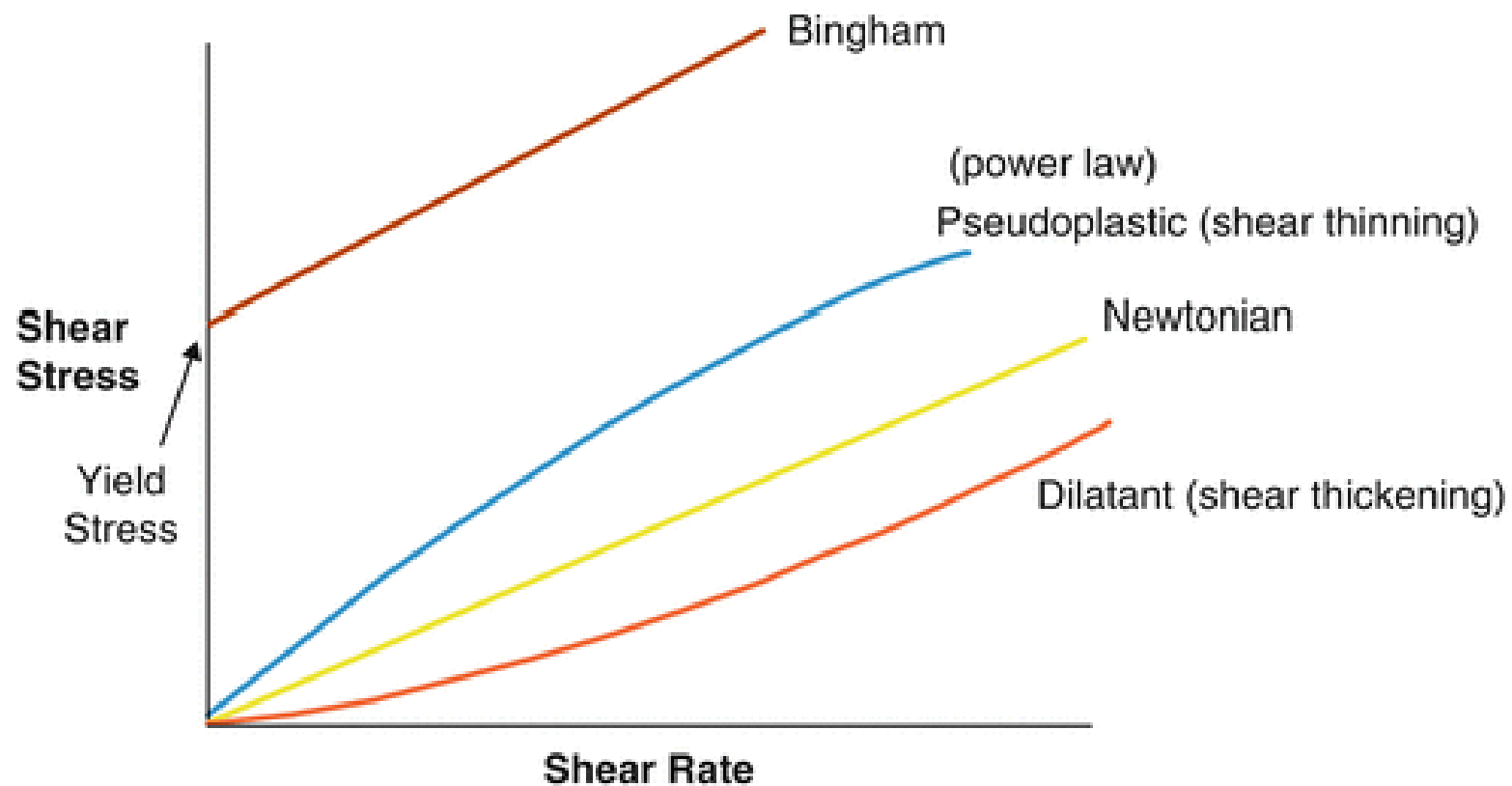
Efecto Weissenberg



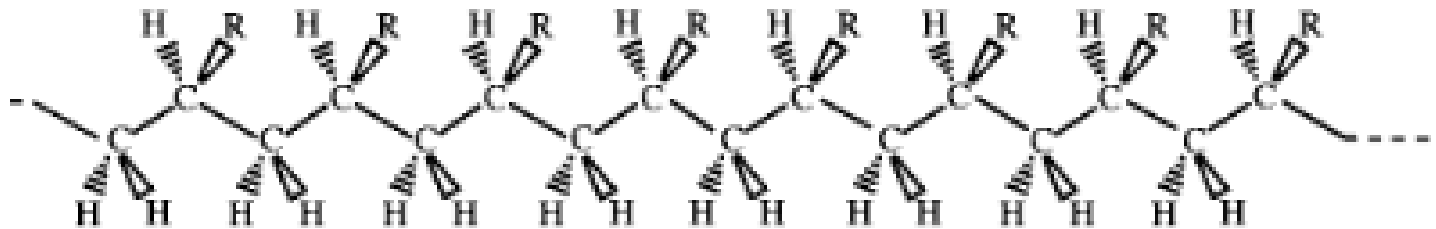
Dilatación a la salida de un tubo



Viscosidad variable

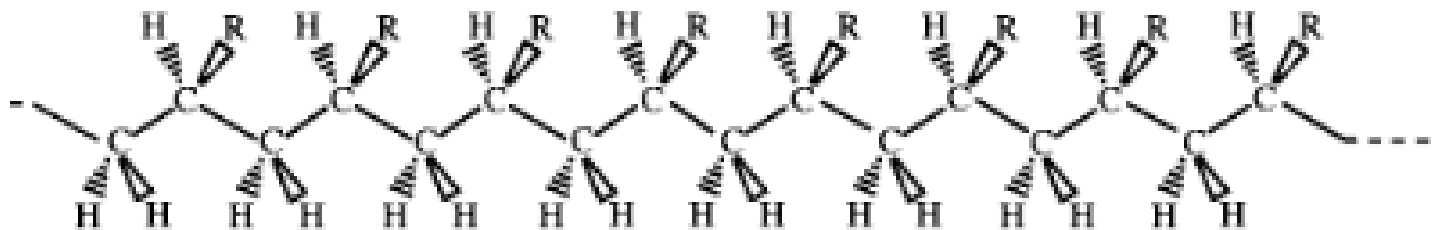


Polímeros



Molécula que es una larga cadena de elementos que se repiten : monómeros

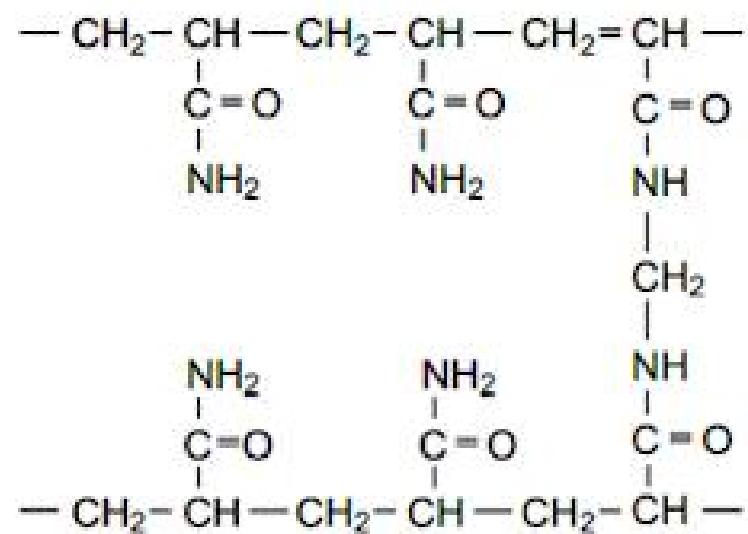
Polímeros



Molécula que es una larga cadena de elementos que se repiten : monómeros

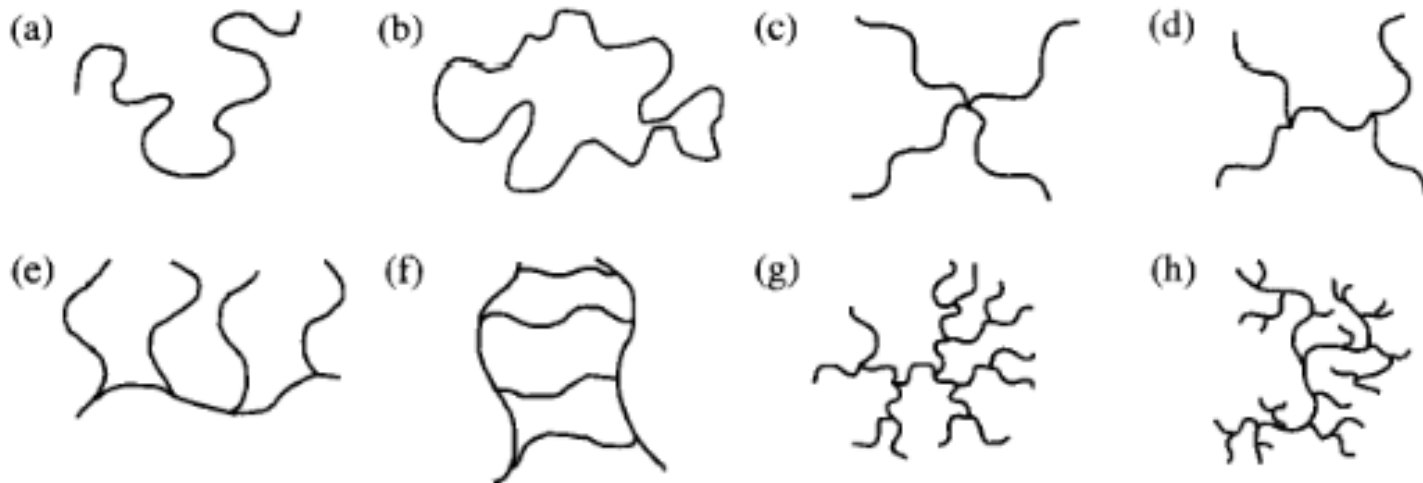
Much of human history has been influenced by the availability of materials. In fact, history is divided into eras named after the primary materials used; the Stone Age, the Bronze Age, and the Iron Age. Similarly, we can assert that in the twentieth century we entered the Polymer Age.

Poliacrilamida



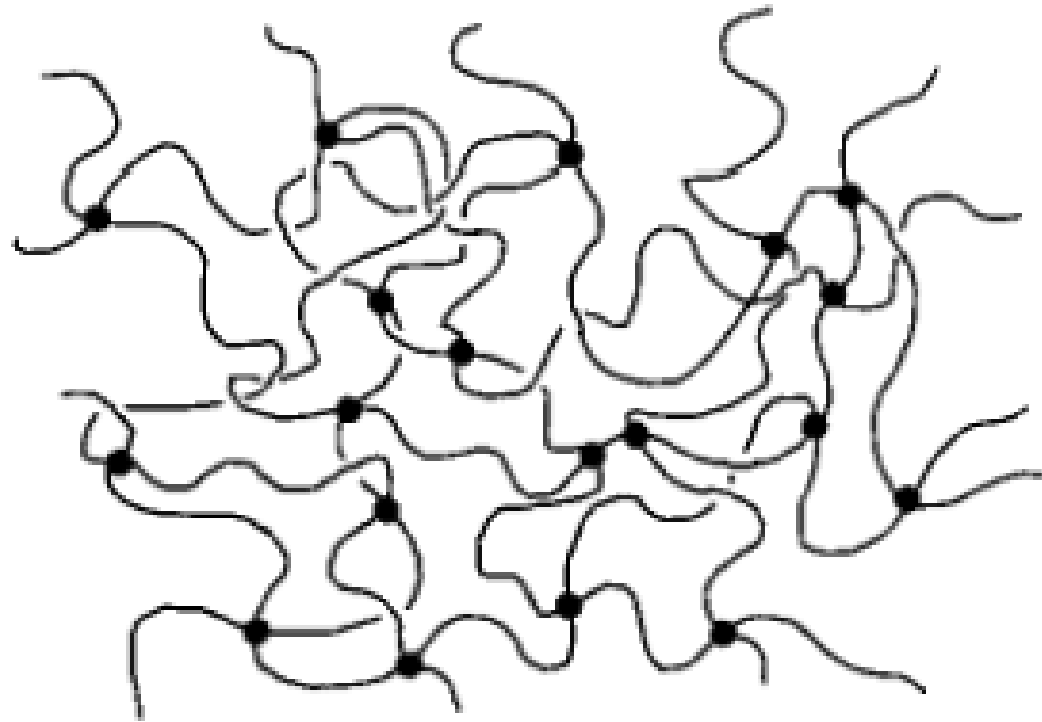
Polímeros

Estructuras



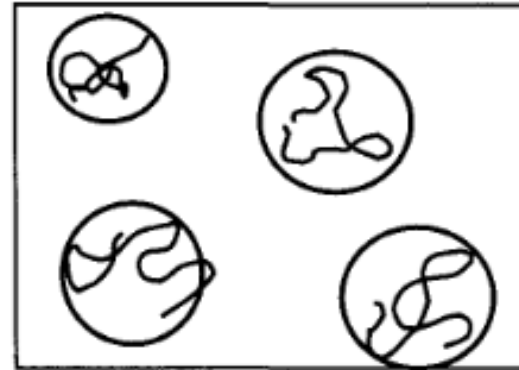
Polímeros

Red de polímeros

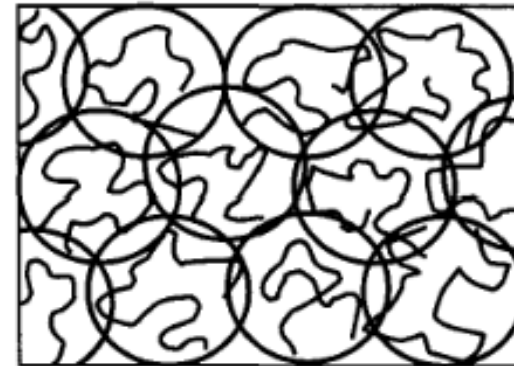


Polímeros

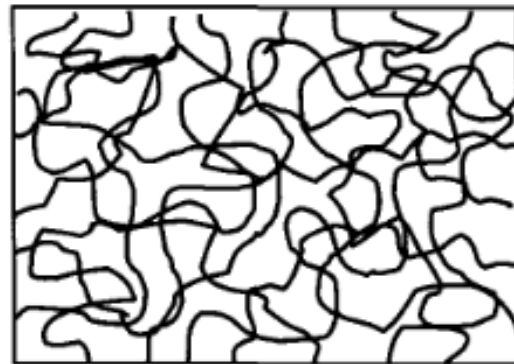
Concentración



Dilute ($\phi < \phi^*$)



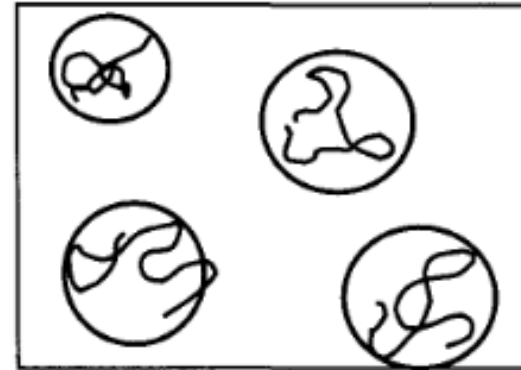
Overlap ($\phi = \phi^*$)



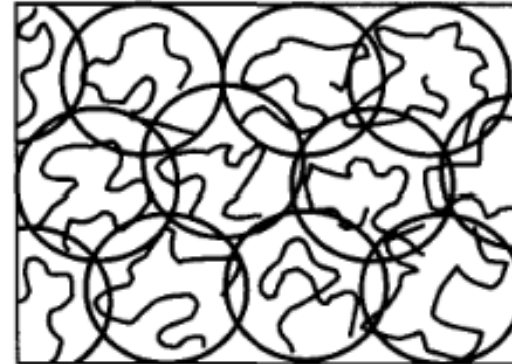
Semidilute ($\phi > \phi^*$)

Polímeros

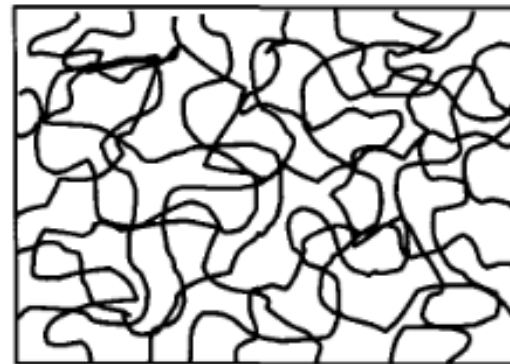
Concentración
De acuerdo a la concentración se
usan diferentes modelos



Dilute ($\phi < \phi^*$)



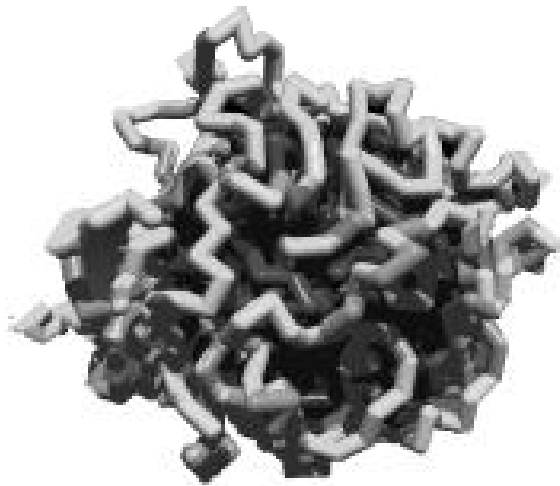
Overlap ($\phi = \phi^*$)



Semidilute ($\phi > \phi^*$)

Polímeros

Presentan diferentes propiedades de extensibilidad y flexibilidad.



Polímeros

Presentan diferentes propiedades de extensibilidad y flexibilidad.

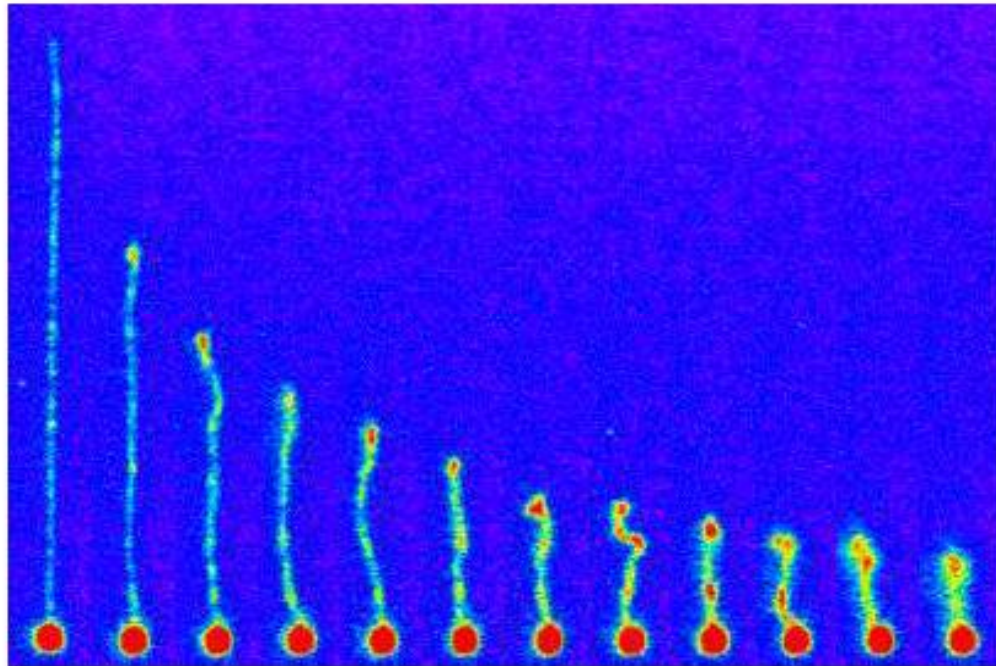
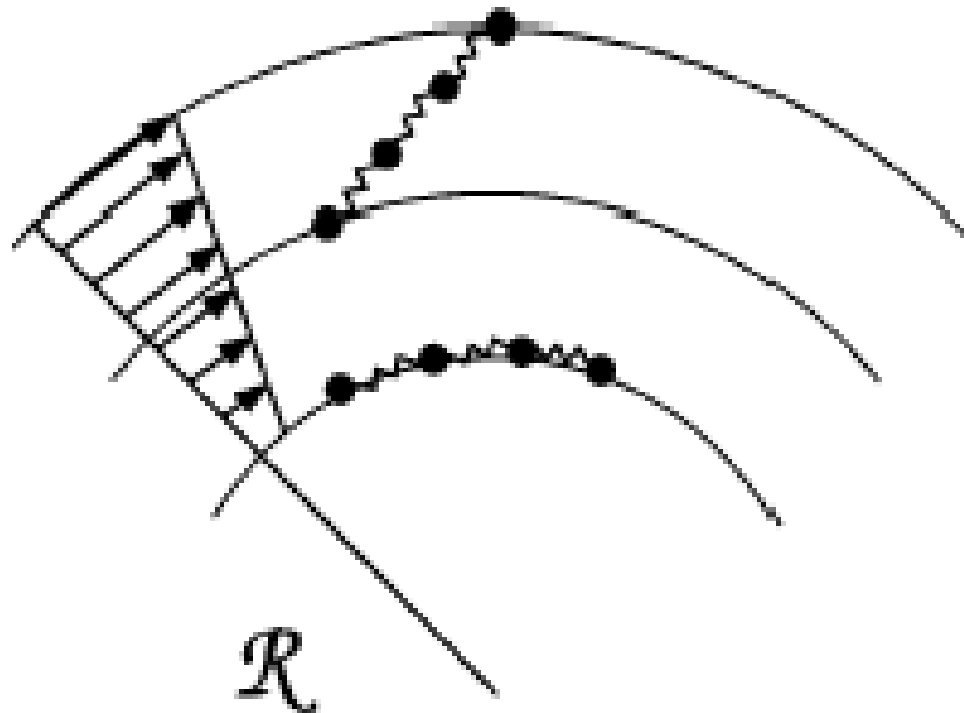


Figure 2.3: Single DNA molecule ($40\mu m$) relaxing to the coiled state. In this experiment a latex bead ($1\mu m$) is tethered to an end of the molecule. The DNA, coloured with a fluorescent dye, is stretched by a uniform flow and successively let free to relax. Images are taken at 5s time intervals, from left to right [34].

Polímeros

Efecto de un flujo no uniforme

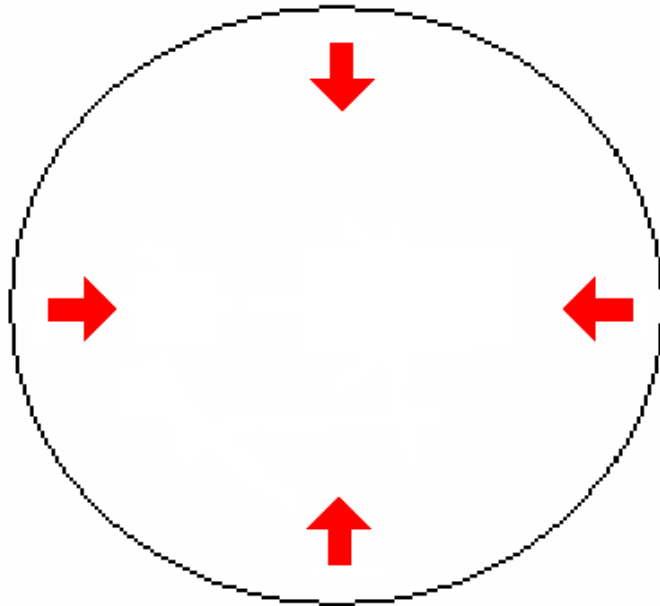


Hoop stress

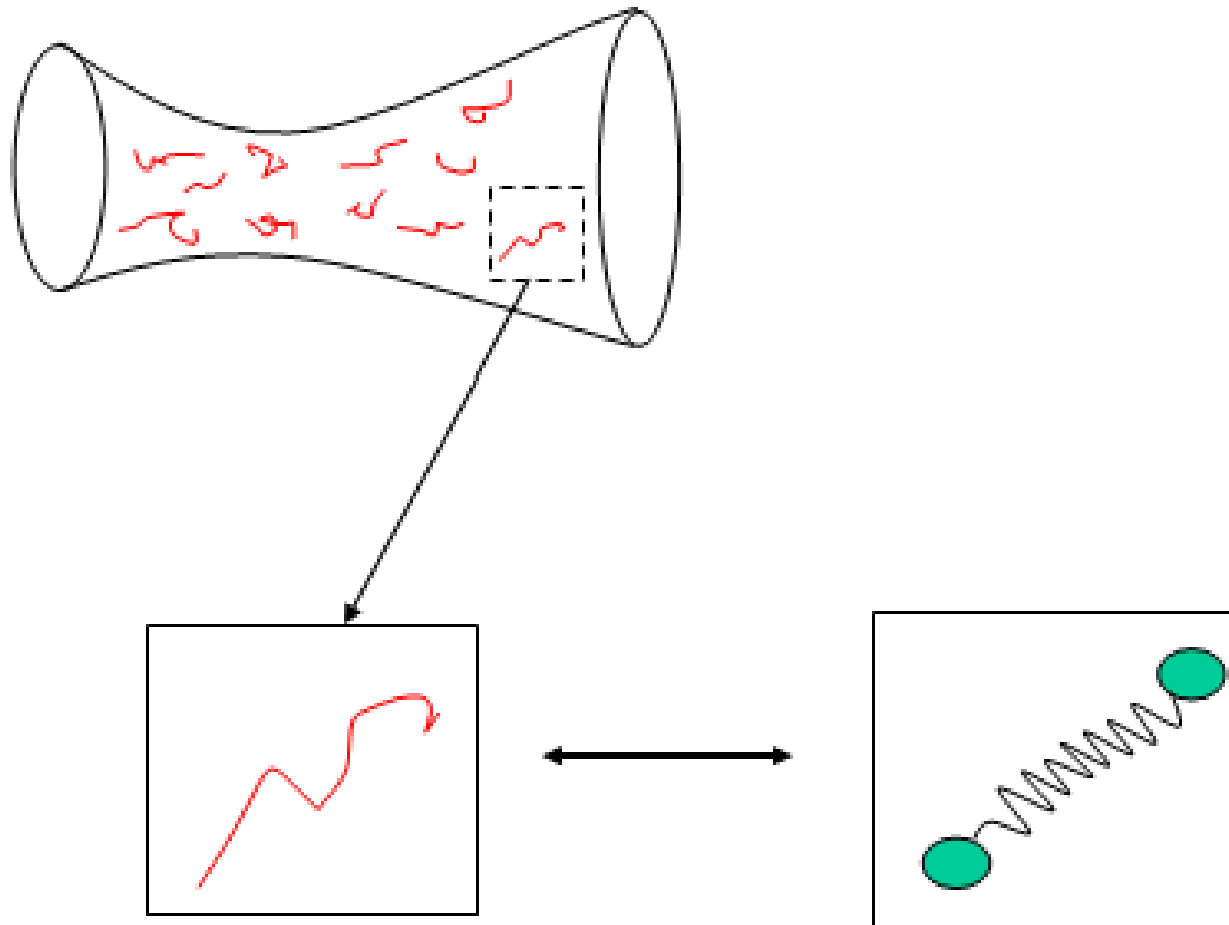
Efecto de un flujo no uniforme

Cuando las líneas de corriente son curvas esto produce un efecto similar a una banda de goma estirada

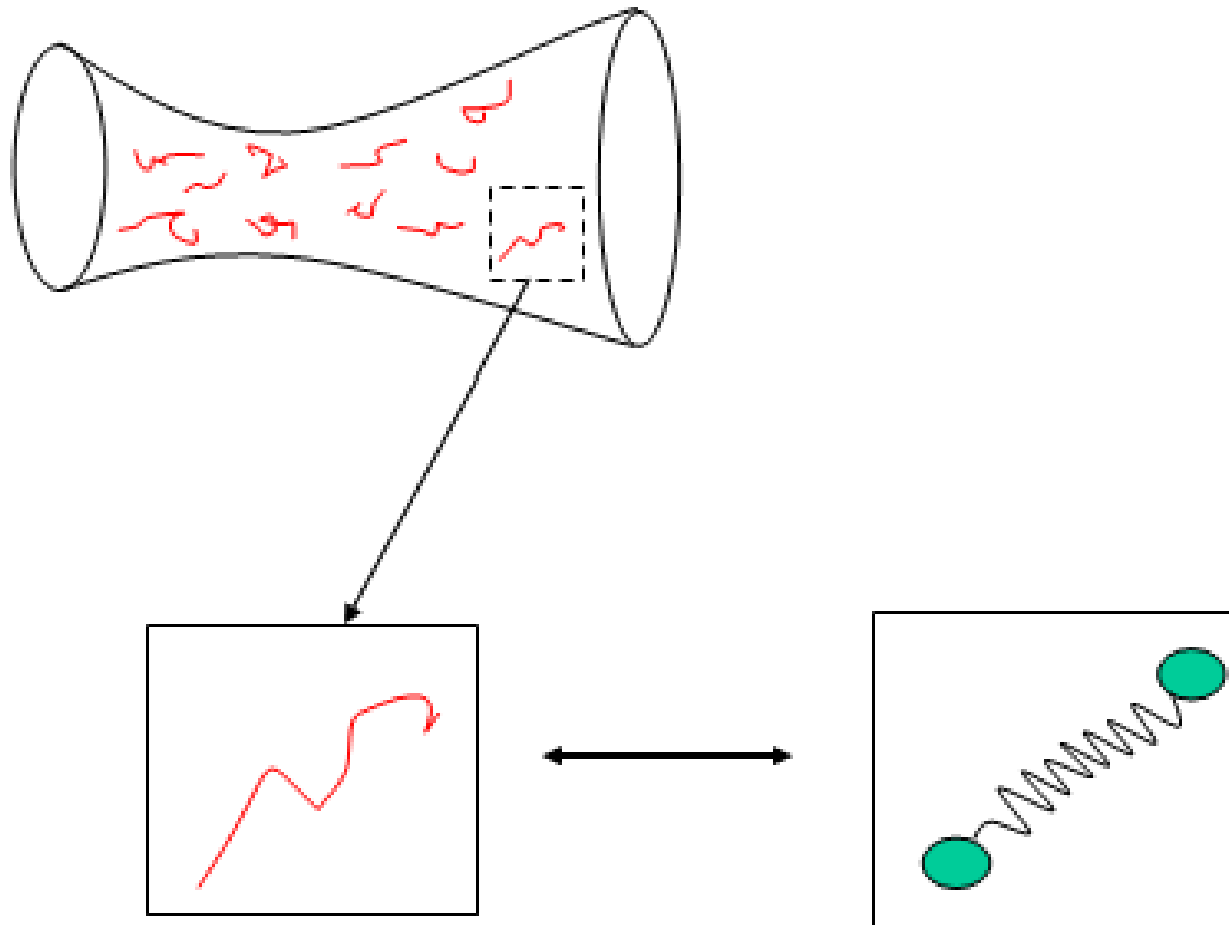
Produce el efecto Weissenberg



Polímeros diluídos



Polímeros diluídos



Polímeros diluídos: modelo

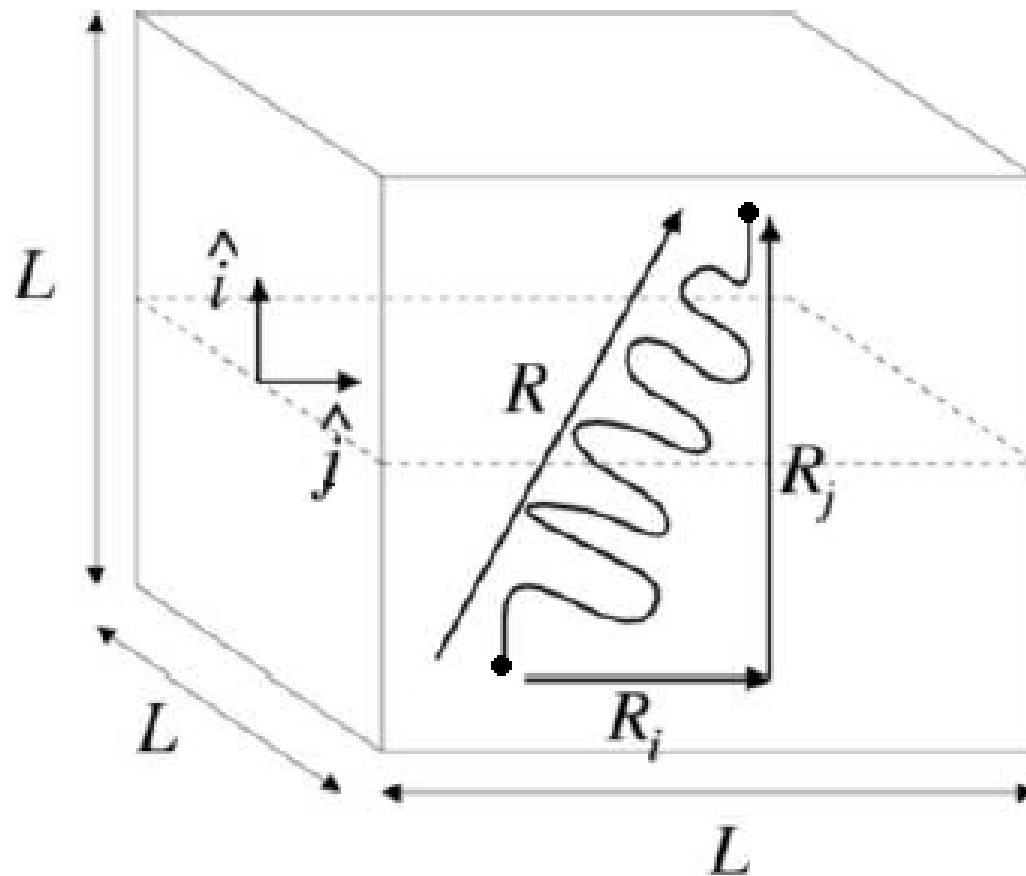
Cada polímero se representa como dos partículas unidas por un resorte lineal

El vector **R** representa la distancia desde una partícula hasta la otra

Hay una fuerza restauradora de la forma

$$f_i = k R_i$$

Polímeros diluídos



$$\sigma_{ij}^p = G \langle R_i R_j \rangle \quad , \quad G = mk$$

$$\sigma_{ij}^c = \langle R_i R_j \rangle$$

$$\sigma_{ij}^c \quad \text{conformal tensor}$$

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{R}) = \mathbf{R}.\nabla \mathbf{u}$$

$$\frac{d}{dt}(R_i R_j) = R_i \frac{dR_j}{dt} + \frac{dR_i}{dt} R_j$$

$$\frac{D\sigma^c}{Dt} = \sigma^c.\nabla u + \nabla^T u.\sigma^c + \frac{1}{\lambda}(R_0^2 \delta_{ij} - \sigma^c)$$

Oldroyd-B

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \nabla \cdot \sigma \quad (2)$$

$$\sigma = -pI + \eta (\nabla u + (\nabla u)^\top) + G \sigma^e \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma^e}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \sigma^e - \sigma^e \cdot \nabla u - (\nabla u)^\top \cdot \sigma^e = -\frac{1}{\lambda} (\sigma^e - I) \quad (4)$$

G módulo elástico , λ tiempo de relajación

Parámetros adimensionales

Reynolds

$$Re = U L / \nu$$

Deborah

$$De = \lambda U / L$$

5.1 Shear flow

Suppose we make our fluid carry out an unsteady shear flow:

$$\underline{u} = (\dot{\gamma}(t)y, 0, 0).$$

If the forcing all depends on y and t only, we expect all the physical variables only to depend on y and t . The mass conservation equation (1) is satisfied. The momentum equation (2) becomes

$$\rho \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \underline{\sigma}.$$

Now the tensor $\underline{\nabla} \underline{u}$ is

$$\underline{\nabla} \underline{u} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \dot{\gamma}(t) & 0 \end{pmatrix}$$

so (3) gives

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} -p & \eta \dot{\gamma}(t) \\ \eta \dot{\gamma}(t) & -p \end{pmatrix} + G \underline{\underline{A}}$$

and (4) becomes

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} A_{xx} & A_{xy} \\ A_{xy} & A_{yy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{\gamma} A_{xy} & 0 \\ \dot{\gamma} A_{yy} & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{\gamma} A_{xy} & \dot{\gamma} A_{yy} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = -\frac{1}{\tau} \begin{pmatrix} A_{xx} - 1 & A_{xy} \\ A_{xy} & A_{yy} - 1 \end{pmatrix}$$

5.1.1 Steady shear flow

Now set $\dot{\gamma}$ as a constant. This means that all the variables should be independent of t :

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{\sigma} = \underline{0}.$$

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} -p & \eta \dot{\gamma} \\ \eta \dot{\gamma} & -p \end{pmatrix} + G \underline{\underline{A}}$$

$$-\begin{pmatrix} \dot{\gamma} A_{xy} & 0 \\ \dot{\gamma} A_{yy} & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{\gamma} A_{xy} & \dot{\gamma} A_{yy} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = -\frac{1}{\tau} \begin{pmatrix} A_{xx} - 1 & A_{xy} \\ A_{xy} & A_{yy} - 1 \end{pmatrix}$$

Let's look at the last equation, for the components of $\underline{\underline{A}}$. It gives three scalar equations:

$$\begin{aligned} -\dot{\gamma} A_{xy} - \dot{\gamma} A_{xy} &= -\frac{1}{\tau} (A_{xx} - 1) \\ -\dot{\gamma} A_{yy} &= -\frac{1}{\tau} A_{xy} \\ 0 &= A_{yy} - 1. \end{aligned}$$

Solving from the bottom up gives

$$A_{yy} = 1 \quad A_{xy} = \dot{\gamma} \tau \quad A_{xx} = 1 + 2\dot{\gamma}^2 \tau^2.$$

The total stress becomes

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} -p + G + 2G\dot{\gamma}^2 \tau^2 & (\eta + G\tau)\dot{\gamma} \\ (\eta + G\tau)\dot{\gamma} & -p + G \end{pmatrix}.$$

The presence of the polymers has made two changes to the Newtonian stress:

- The viscosity is increased from η to $\eta + G\tau$
- There is a difference between the two diagonal stress components.

This difference is called the first normal stress difference

$$N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} = 2G\tau^2 \dot{\gamma}^2.$$

As a stress acting along the flow lines (xx -direction) it has the opposite sign to pressure so it acts like a tension: the streamlines are like stretched rubber bands. It is the driving force behind the rod-climbing experiment.

Viscosidad $\eta' = \eta + G \lambda,$

Aunque se tome $\eta=0$, el polímero produce un término de viscosidad

Viscosidad debida al polímero: $\eta'' = G \lambda$

Esferas en viscoelásticos

Comportamiento de una esfera pequeña moviéndose en un viscoelástico

Interacciones entre esferas

Sedimentación de muchas esferas

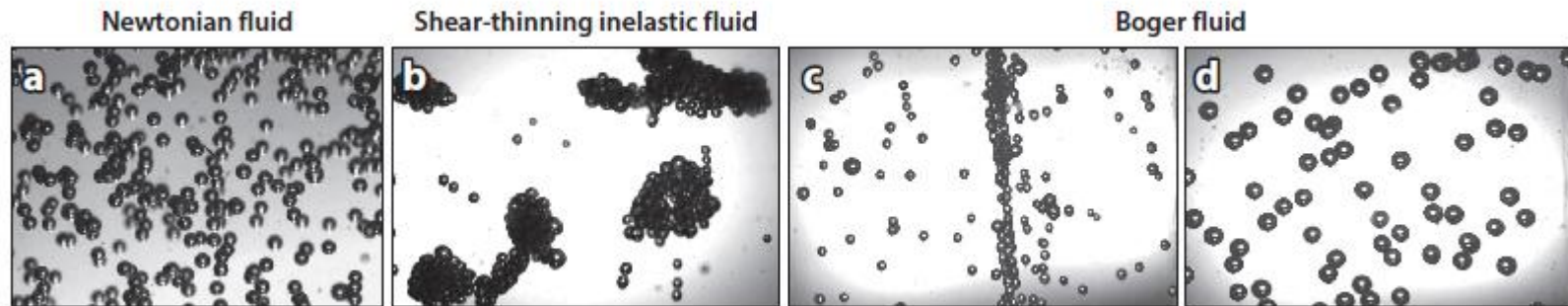
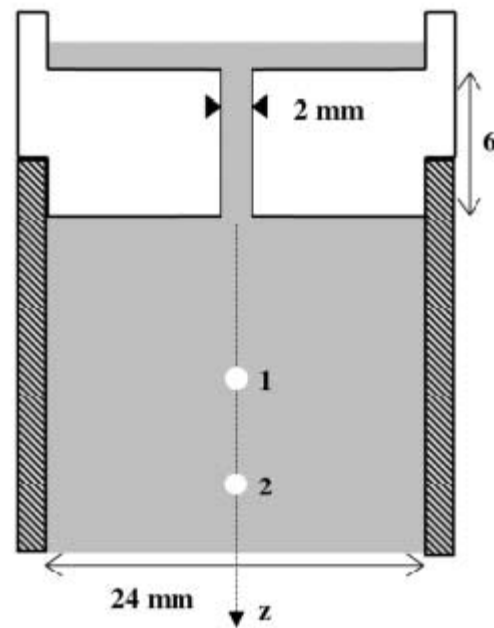


Figure 10

Variedad de comportamientos

Fluido newtoniano : atracción a corta distancia



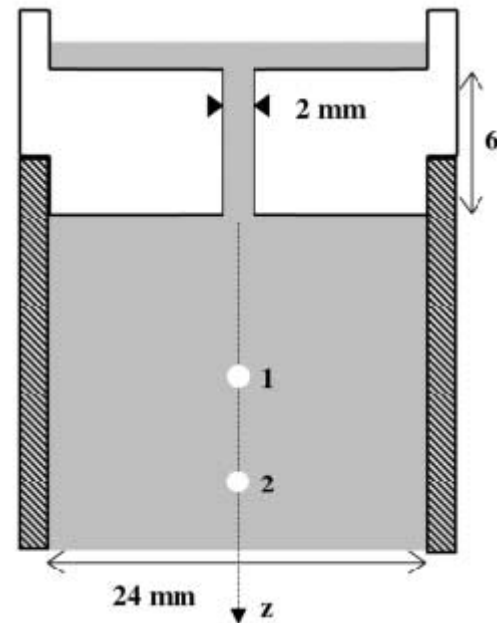
Variedad de comportamientos

Riddle M.J., Narvaez C. and Bird R.B. (1997)

2 esferas:

Atracción si $d < d_c$

Repulsión si $d > d_c$



Variedad de comportamientos

Daugan S., Talini B., Herzhaft B. and Allain C. (2002)

2 esferas:

Atracción si $d < d_c$

Sin interacción si $d > d_c$

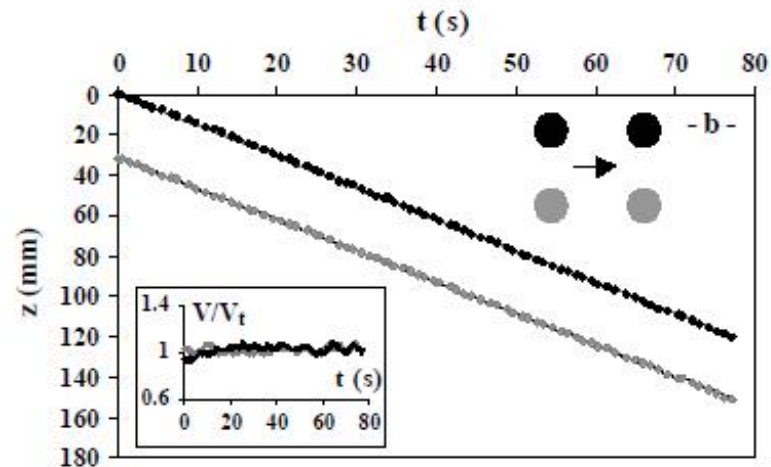
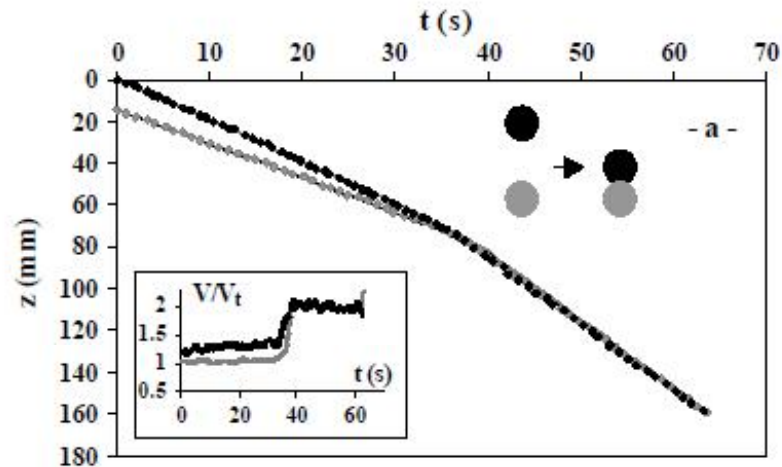
Variedad de comportamientos

Daugan S., Talini B., Herzhaft B. and Allain C. (2002)

2 esferas:

Atracción si $d < d_c$

Sin interacción si $d > d_c$



Variedad de comportamientos

Bot E.T.G., Hulsen M.A. and van den Brule B.H.A.A.,

2 esferas Boger fluid:

Repulsión si $d < d_c$

Atracción si $d > d_c$

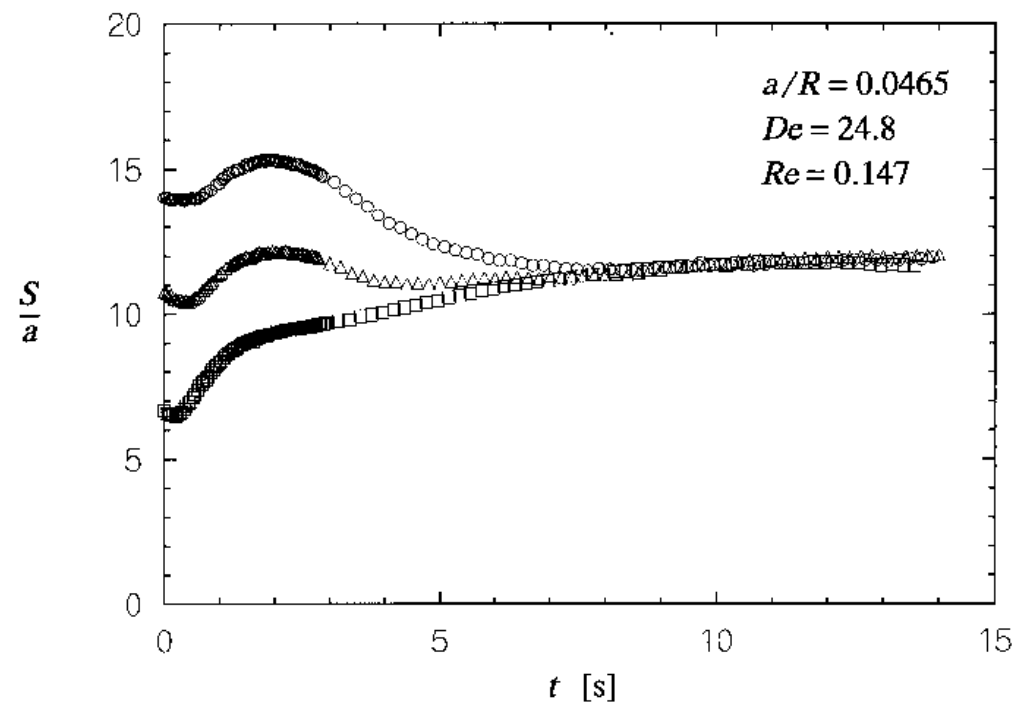


Table 1 Experimental observations of the interaction between two particles settling one atop the other (vertical configuration) in a variety of non-Newtonian fluids

Reference	Fluids and rheology	Parameters	Main observations	Interpretation
Eisenberg et al. 2013	Polyisobutylene solution (viscoelastic and shear thinning)	$0.4 < De < 3.5$, $Re \ll 1$	Attraction and formation of doublet	Due to elastic normal stresses; no negative wake; shear thinning unimportant
Gumulya et al. 2011	Polyacrylamide solution (viscoelastic, shear thinning, and with yield stress)	$De \approx 2,000$ (based on shear relaxation time), $0.003 < Re < 0.084$	Attraction and formation of doublet	Due to memory of reduced viscosity; elasticity effect should also exist but is never mentioned
Verneuil et al. 2007	Xanthan solution (shear thinning and with memory)	$21 < De < 512$, $Re \ll 1$	Attraction and formation of doublet	Likely due to memory of shear thinning; negative wake unimportant
Gueslin et al. 2006	Laponite suspension (shear thinning and with memory and yield stress)	De not given, $Re \ll 1$	Attraction and formation of doublet	Due to memory of shear thinning; negative wake unimportant
Daugan et al. 2002a	Xanthan solution (shear thinning and with memory)	$45 < De < 200$, $Re \ll 1$	Attraction and formation of doublet	Due to memory of shear thinning; validates corridor of reduced viscosity
Bot et al. 1998	Polyacrylamide-based Boger fluid	$2 < De < 30$, $Re \approx 0.1$	Attraction at large separation and repulsion at small separation	Long-range viscoelastic attraction and short-range modulation of elongation-dominated wake
Gheissary & van den Brule 1996	Inelastic and elastic shear-thinning fluids; Boger fluid	De not given, $Re < 0.05$	Attraction with shear thinning and repulsion for Boger fluids	Attraction due to memory of shear thinning; repulsion due to elasticity
Joseph et al. 1994	Inelastic and elastic shear-thinning fluids; Boger fluid	$10^{-3} < De < 6$, $10^{-3} < Re < 0.4$	Attraction and formation of doublet in all cases	Memory of shear thinning and elasticity as separate mechanisms for attraction
Riddle et al. 1977	Viscoelastic, shear-thinning fluids	$1 < De < 30$, $Re < 0.05$	Attraction at small separation and repulsion at large separation	Far-field repulsion due to negative wake (Bird et al. 1987)

Abbreviations: De , Deborah number; Re , Reynolds number.

Comportamientos observados

- A) Atracción cercana, repulsión lejana
- B) Atracción cercana, sin interacción lejana
- C) Repulsión cercana, atracción lejana

Explicaciones para las interacciones

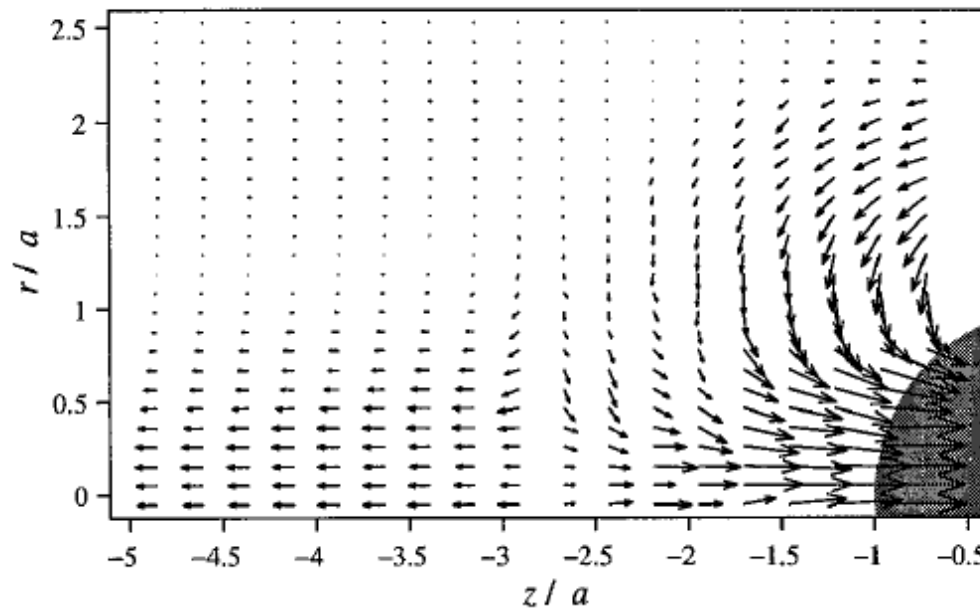
Atracción

- 1) Efecto elástico. Se reproduce en simulaciones con Oldroyd-B.
- 2) Corredores de viscosidad.
- 3) Barrido de polímeros .

Explicaciones para las interacciones

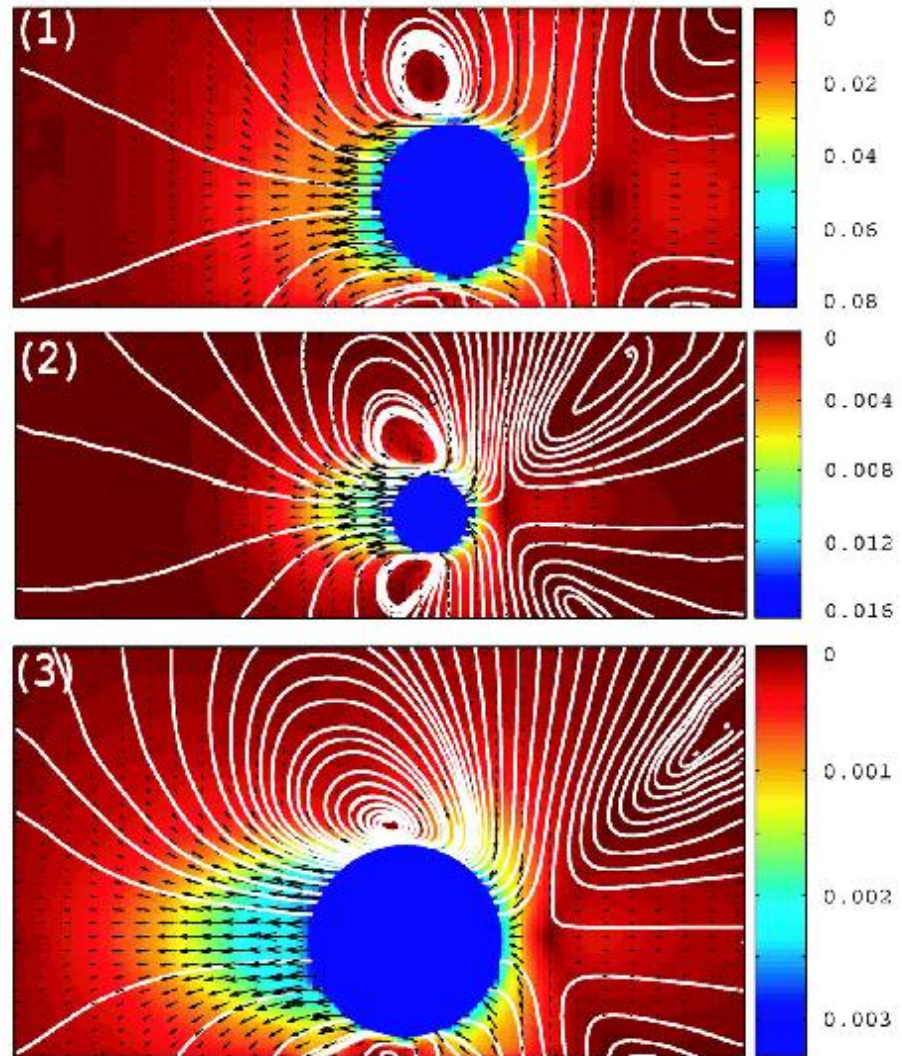
Repulsión lejana (poco observado)

“Negative wake”



Explicaciones para las interacciones

“Negative wake”



Explicaciones para las interacciones

Repulsión cercana (fluidos *Boger*)

Efecto elástico según modelo de masas-resortes, pero no resulta claro el origen.

Comportamientos observados

- A) Atracción cercana, repulsión lejana
- B) Atracción cercana, sin interacción lejana
- C) Repulsión cercana, atracción lejana

Comportamientos

Qué factores controlan el comportamiento?

Se usaron diversidad de fluidos viscoelásticos en los experimentos mencionados.

Se pueden obtener los diferentes casos con el mismo polímero?

Experimentos

Poliacrilamida

Fluid	Polyacrylamide (%)	Glycerin (%)
P1G60	1	60
P1G90	1	90
P2G60	2	60

Experimentos

Poliacrilamida

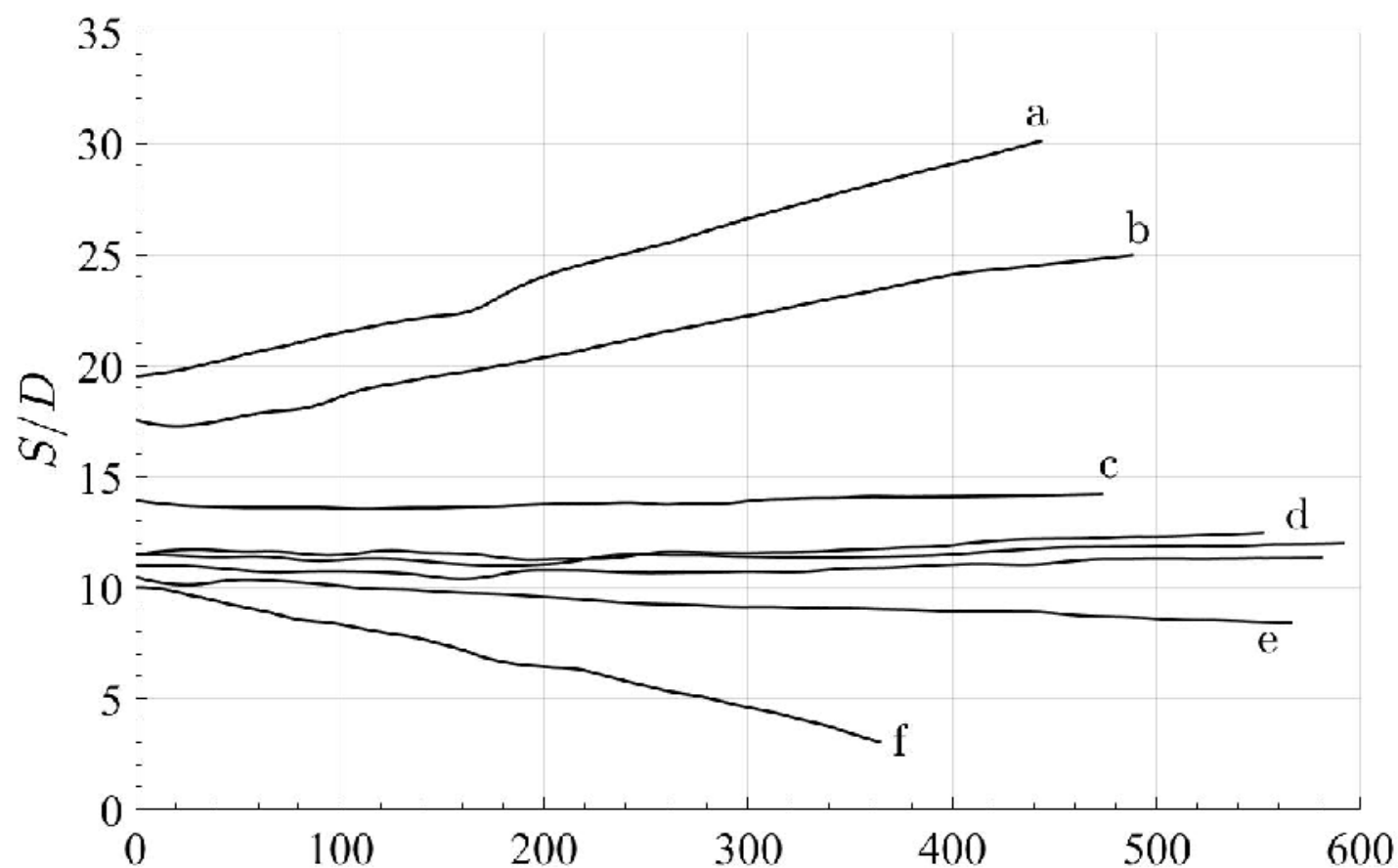
TABLE II. Parameters of the linear viscoelasticity model η_k , λ_k , zero-shear-rate and solvent viscosity η_0 , η_s , the relaxation time λ and the Carreau's parameter Λ obtained from fitting of the rheological data.

Fluid	Mode	λ_k (s)	η_k (Pa s)	η_0 (Pa s)	η_s (Pa s)	λ (s)	Λ (s)
P2G60	1	101	64.6	143	0.01	50.9	47.5
	2	13.3	55.2				
	3	0.95	19.8				
	4	0.05	3.41				
P1G60	1	0.52	0.606	1.74	0.01	0.22	0.72
	2	0.12	0.502				
	3	0.02	0.246				
	4	0.003	0.378				
P1G90	1	5.13	7.62	23.4	0.22	1.99	4.52
	2	0.80	8.81				
	3	0.09	4.01				
	4	0.01	3.05				

Experimentos

Poliacrilamida

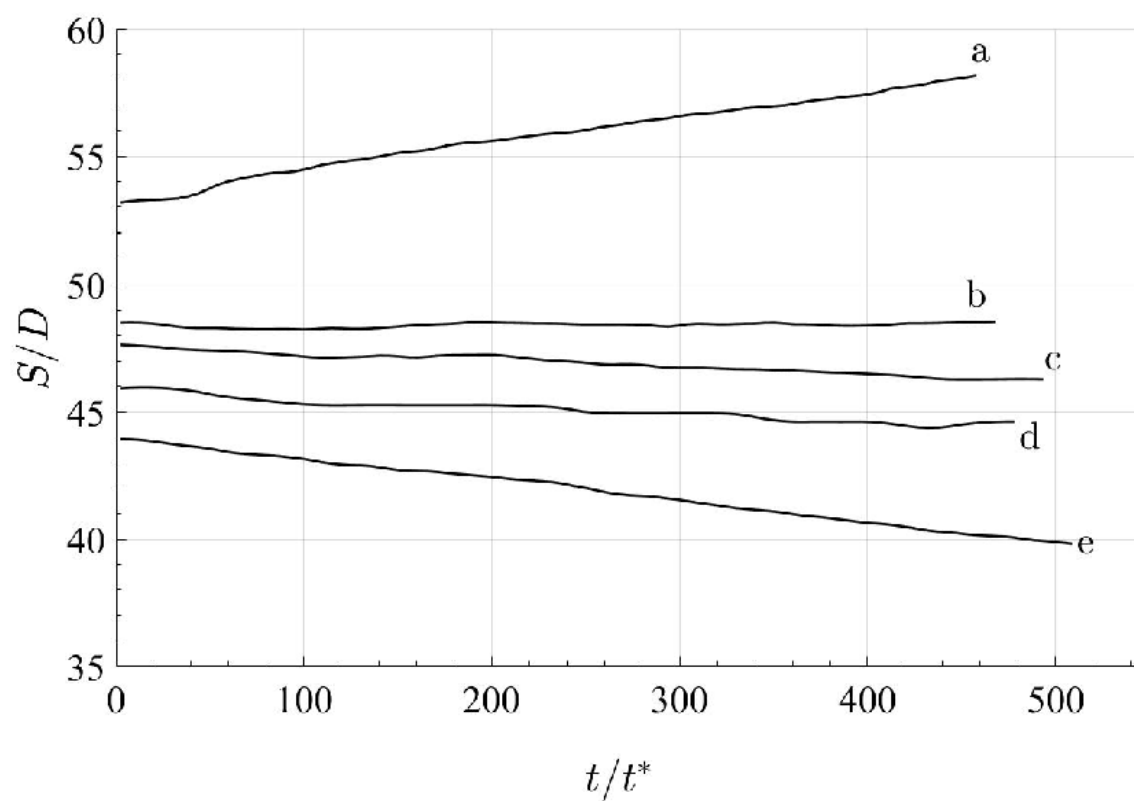
P2G60,



Experimentos

Poliacrilamida

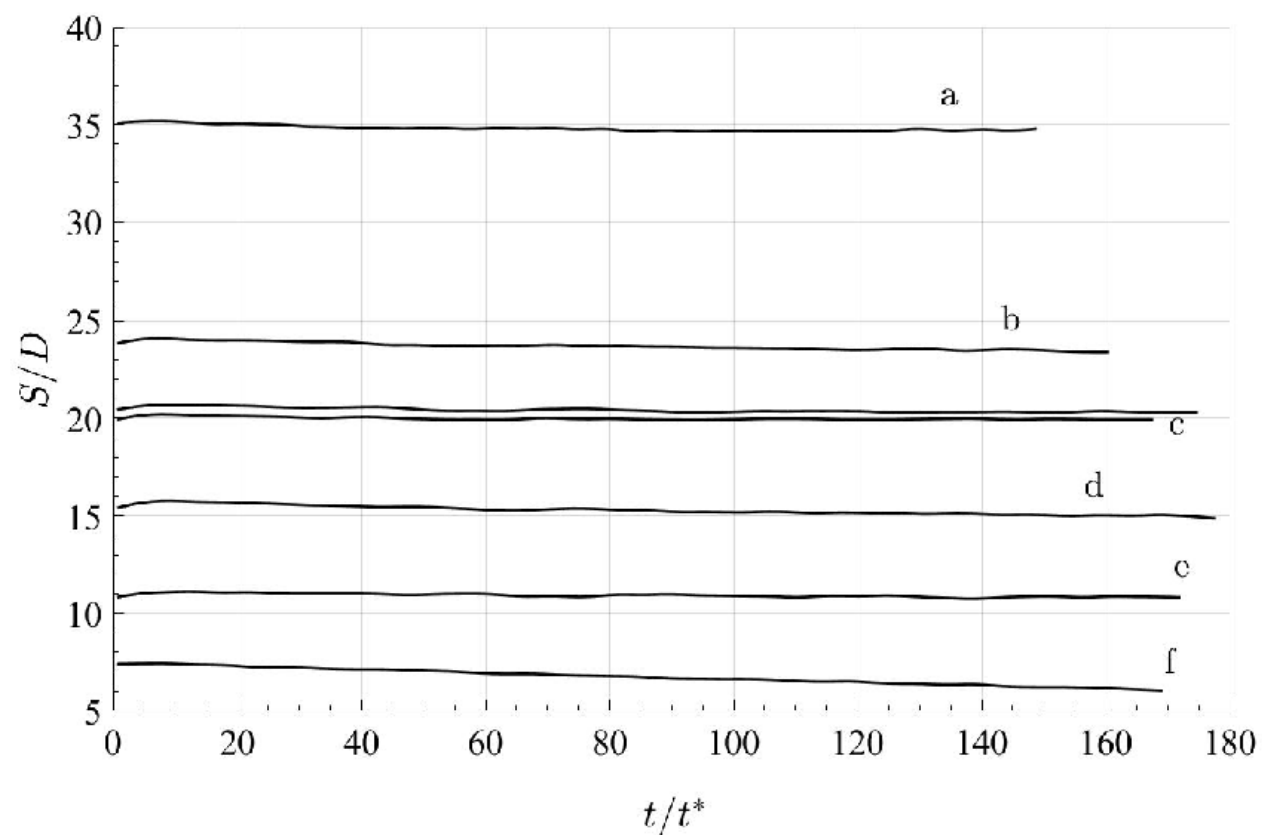
P1G60



Experimentos

Poliacrilamida

P1G90



Experimentos: resultados

Logramos obtener los comportamientos A y B mencionados anteriormente con el mismo polímero, mediante el cambio del solvente (% glicerina), en P1G60 y P2G60.

En P1G90 solamente se observó B.

Experimentos

Logramos obtener los comportamientos A y B mencionados anteriormente con el mismo polímero, mediante el cambio del solvente (% glicerina), en P1G60 y P2G60.

En P1G90 solamente se observó B.

El comportamiento A había sido observado solo una vez y se dudaba que hubiese sido obtenido por error.

Solamente observamos el comportamiento A si:

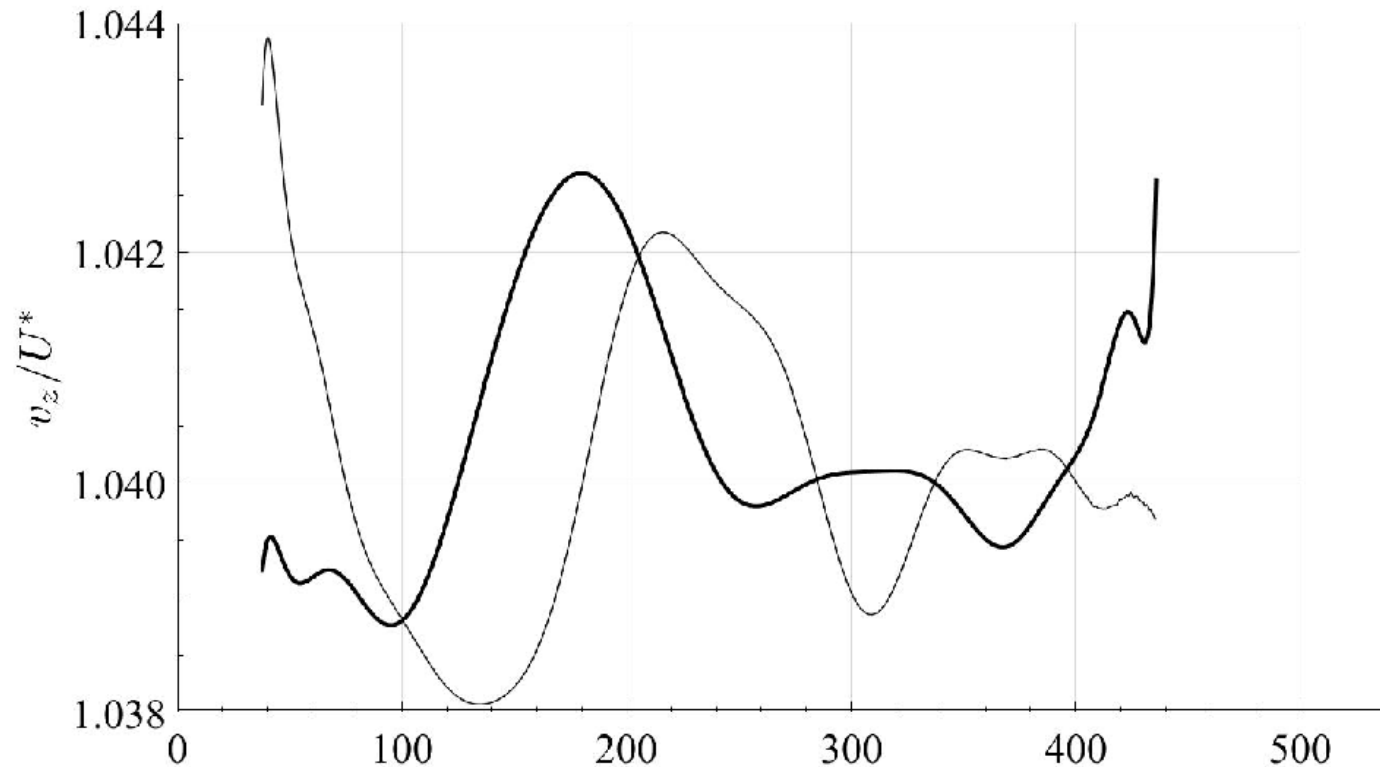
- 1) El fluido se deja reposar durante un tiempo de orden 1 día, mucho mayor que el tiempo característico.
- 2) El solvente no es muy viscoso .

Posible causa del tiempo de espera para observar la repulsión

Los mecanismos mencionados de repulsión (repulsión cercana ó *negative wake*), no permiten explicar el largo tiempo de espera. Son producidos por polímeros independientes.

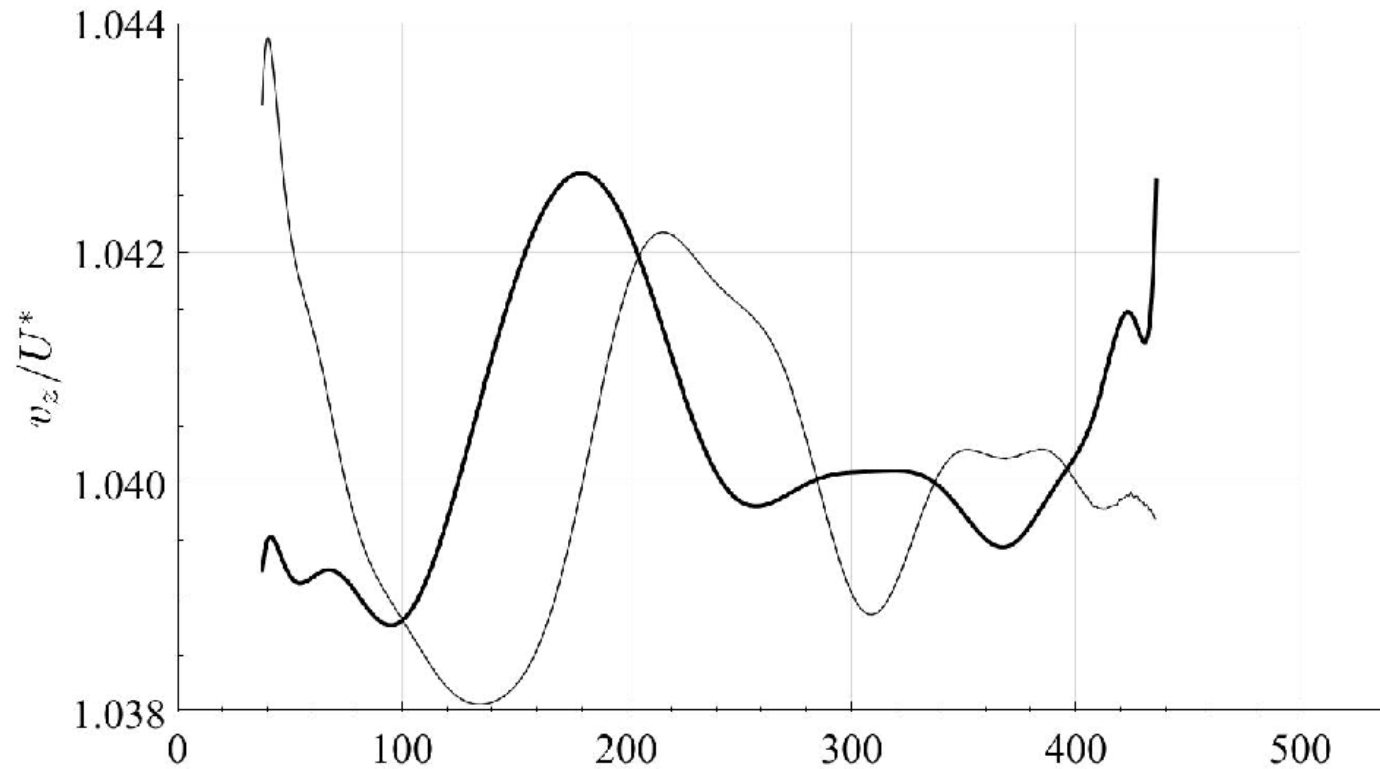
Posible causa: los polímeros podrían formar enlaces entre sí que se rompen al pasar las esferas.

Las correlaciones sugieren que las variaciones de velocidad son producidas por estructuras en el fluido



Separation regimes of two spheres falling in shear-thinning viscoelastic fluids, D. Freire , L.G. Sarasua, A. Vernet , S. Varela , G. Usera, C. Cabeza, A. Martí, *Physical Review Fluids*, **4** (2019).

Las correlaciones sugieren que las variaciones de velocidad son producidas por estructuras en el fluido



$$C(t_f) = \langle \delta v_{z1}(t) \delta v_{z2}(t + t_f) \rangle$$

Posible efecto de red

Suponemos que los polímeros forman una red que se rompe, y por eso hay que esperar un tiempo que no tienen nada que ver con el tiempo de relajación.

Pensamos testear esta hipótesis usando reología.

Modelo de red

Ecuación de ondas

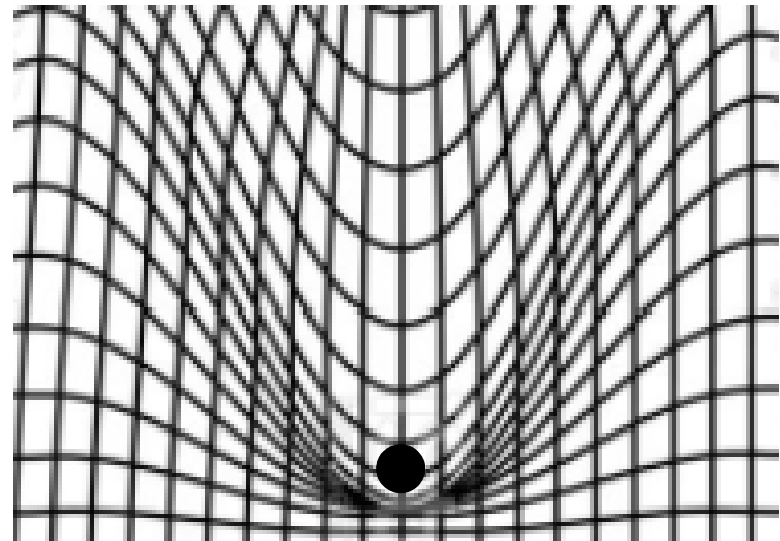
$$e_a \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - c \nabla \cdot \nabla \mathbf{u} = f$$

f en la ecuación corresponde a la perturbación de las esferas

Esferas:

$$\ddot{z}_1 - G + f(z_1, \dot{u}) = 0$$

$$\ddot{z}_2 - G + f(z_2, \dot{u}) = 0$$



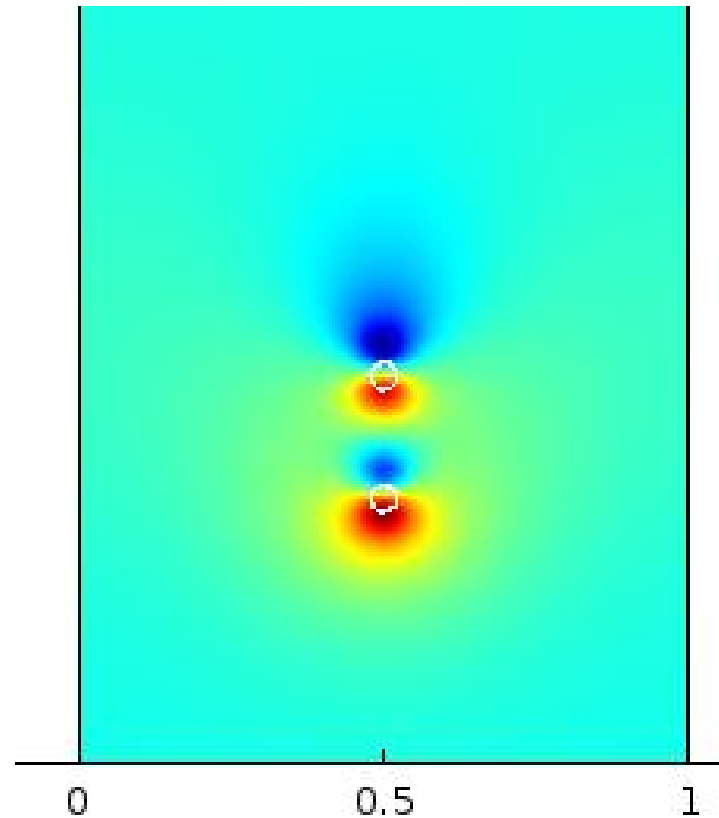
Modelo de red

Ecuación de ondas

$$e_a \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - c \nabla \cdot \nabla \mathbf{u} = f$$

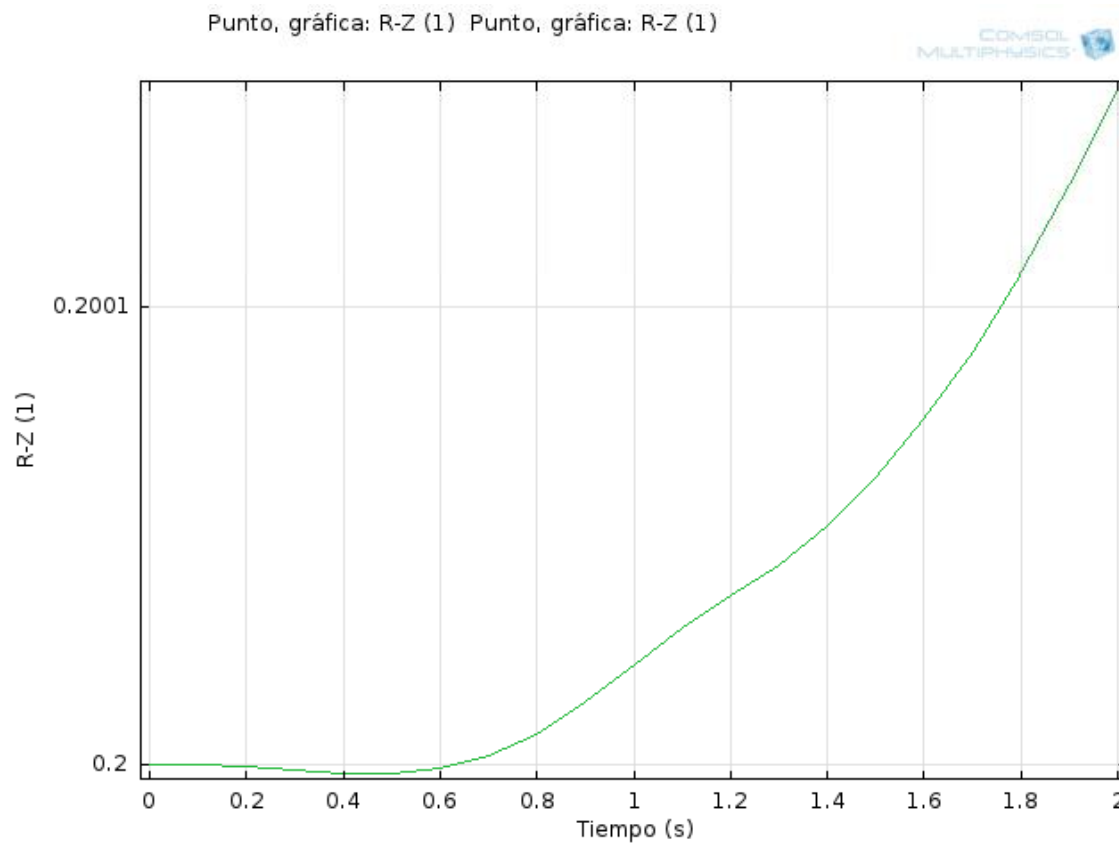
f perturbacion de las esferas

Los colores indican velocidad de la red

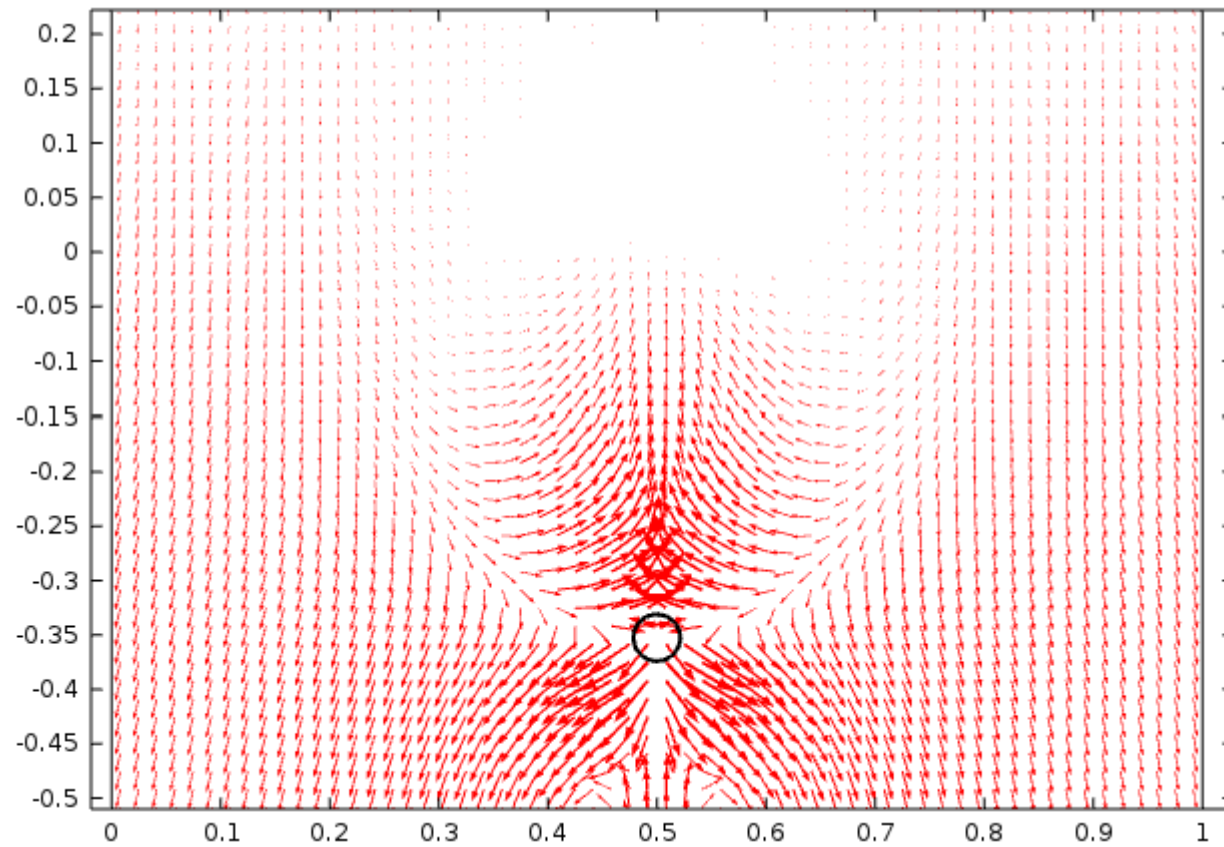


Interacciones

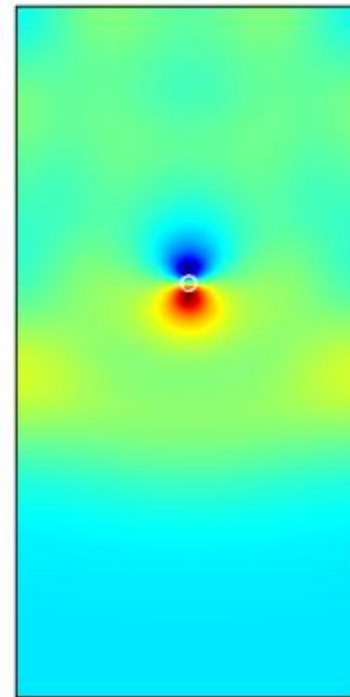
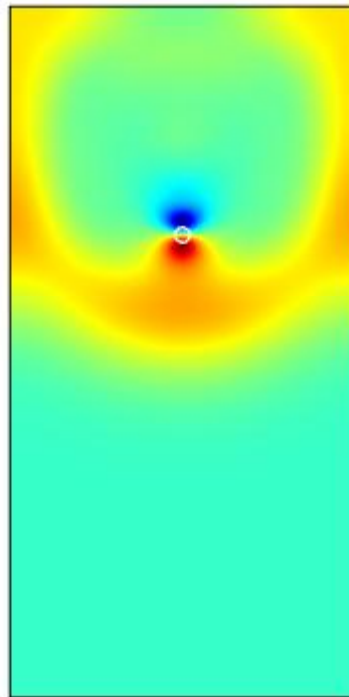
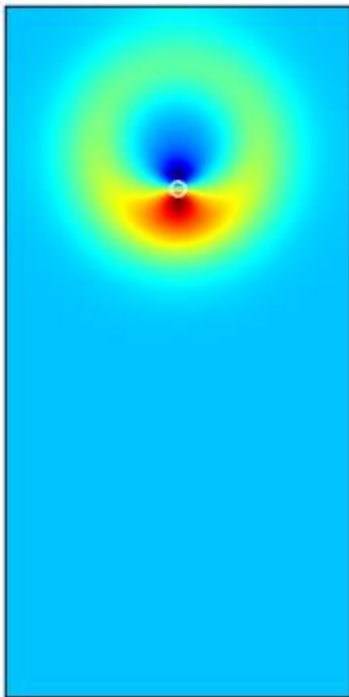
Las partículas interactúan mediante la red: repulsión



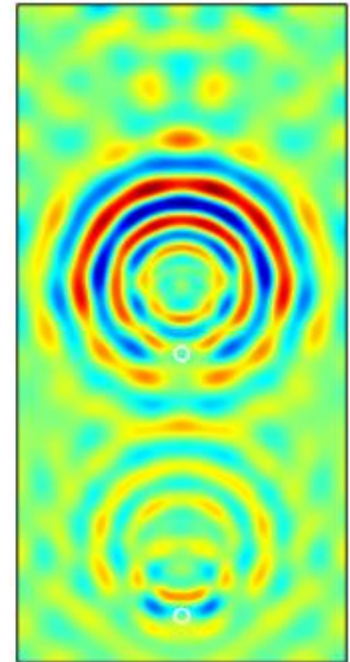
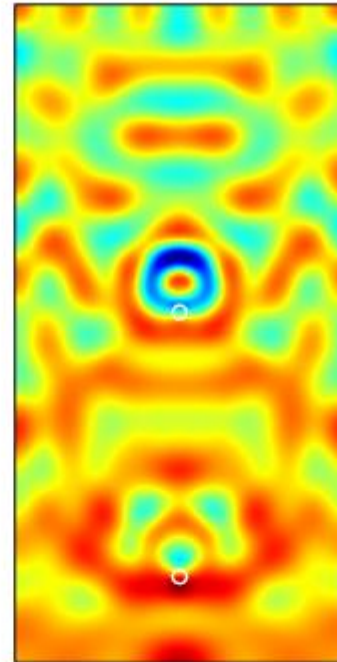
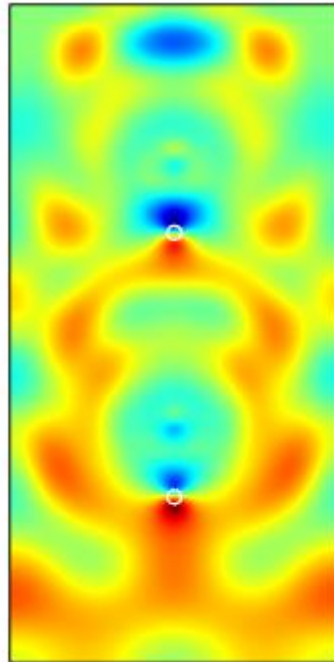
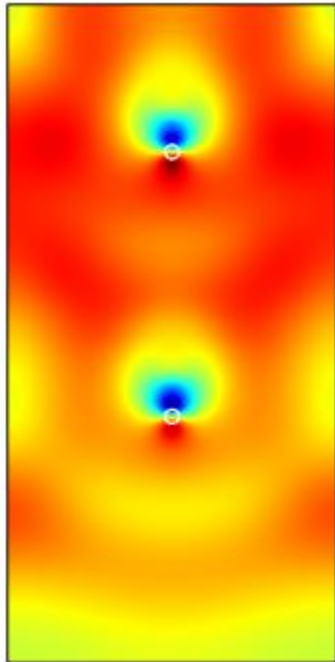
Negative wake



Oscilaciones



Oscilaciones



Conclusiones y trabajo futuro

- Reproducimos un régimen observado una sola vez y mostramos las condiciones para que se observe
- El mismo polímero puede mostrar los dos regímenes A y B
- Probablemente el mismo polímero pueda mostrar los 3 regímenes A , B, C.
- Estudiamos actualmente la hipótesis de que la dependencia de comportamiento con el tiempo de espera es un debido a conexión entre polímeros
- Proyectamos experimentos específicos para testear esta hipótesis
- De ser correcta la interpretación se estaría mostrando que para considerar un fluido polimérico como diluido o no, se debe tener en cuenta el tiempo de reposo.

Fin