

## La Química en el siglo XX y lo que nos depara el siglo XXI

# Reología: los atractivos de la deformidad

Javier Cruz\*

Cualquiera en su sano juicio tendría al siguiente experimento como uno para idiotas: darle un cabezazo a un vidrio grueso para averiguar si su estado es sólido o líquido. Es un ejercicio que puede deseársele a más de uno, ciertamente, pero que pocos querrían hacer por sí mismos, al menos por dos razones: a) porque toda la experiencia cotidiana se nos agolpa del lado de que el vidrio grueso no es líquido sino sólido; y b) porque, como consecuencia inmediata de lo anterior, el experimento conducirá, sin más, a un jaquecón con arreglo *fcc*, *face centered cubic*.

Es curioso, sin embargo, que poca gente considere como para idiotas esta pequeña historia, sorprendentemente popular en las escuelas de física, ingeniería y matemáticas de varios continentes (Zanotto, 1998). Ocurre que los recuentos anecdóticos de que los vitrales góticos son más gruesos en su parte inferior que en la superior han dado impulso al argumento de que el vidrio —sólido en escalas de tiempo humanas, como meses o años— es, de hecho, un fluido, y que tal carácter se manifiesta mediante el escurrimiento, exasperantemente lento, sólo al cabo de varios cientos de años.

De ahí, se alegra, que los vidrios góticos sean más gruesos abajo. Y de ahí, también, que si a uno le dolía ya la cabeza luego de haberla empleado para topar con la solidez del material, acabe por doler más tratando de entender que el tal sólido no es sino un líquido, aunque sea lento como el caballo del malo.

Aún así, eso no es nada cuando se le compara con uno de los materiales más genuinamente prodigiosos que pueda ser hallado en casa: la pasta de dientes. Dado que hay pocas cosas tan fáciles como hacerla escurrir del tubo, no hay duda de que se trata de un líquido.

Aunque, bien mirado, el asunto no es tan trivial. Pruébese este segundo experimento para cretinos: quítese la tapa de un tubo de pasta dentífrica y colóquese verticalmente, con la boca del tubo desta-

pada hacia abajo. Tratándose, como hemos anticipado, de un fluido..., fluiría, ¿no?

Pues, al menos en los primeros 5 minutos, no. Ni en los 15 siguientes.

Puede que comience a escurrir en menos tiempo que los 800 años que le toma al "líquido" vidrio acumular unos milímetros en la parte inferior de un vitral, pero, aún así, la fluida pasta de dientes puede sorberle la paciencia al más pintado, sin dejar de comportarse como un "sólido".

Como decía Tin-Tan: *étons qué?*

(Para tranquilidad de los lectores débiles de carácter, todo tiene explicación. El vidrio es sólido (Plumb, 1989); y, si acaso fuese líquido y no lo hubiésemos notado del todo bien, tendría que estar sobre los 400°C de temperatura para fluir apreciablemente en 800 años (Zanotto, 1998), o bien le haría falta un lapso bastante mayor que la edad del Universo para fluir de forma semejante, a temperatura ambiente. En cuanto a la pasta dental, el truco descansa simplemente en que es un material diseñado para resistir, cual sólido, todo esfuerzo mecánico que caiga por debajo de un umbral equivalente a la ligera presión de los dedos sobre el tubo. Una vez rebasado este umbral, el material responde como un fluido harto dócil.)

### Una escala muy grande y otra chiquita

Ciertamente, tienen más *sex appeal* las fibras de vidrio, las estructuras sandwich o los compuestos de grafito, que la pasta dental, el champú o la clara de huevo.

Pero no necesariamente hay mejor ciencia de materiales en un clavo de tungsteno insertado en el fémur fracturado de un ciudadano con mala suerte, que en el paté de fabricación industrial con el que se haya manufacturado su comida con mal gusto.

Es sólo que son ámbitos distintos del conocimiento, con diversos grados de espectacularidad en cuanto a sus aplicaciones.

Un buen ejemplo es el Kevlar con que se manufactura, desde hace pocos años, una buena parte de las raquetas de tenis más sorprendentes. Es un ma-

\*Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

terial significativamente más ligero que el aluminio —al cual vino a reemplazar—, pero con una resistencia al impacto que es comparable. Donde lo aventaja notablemente es en sus propiedades en condiciones de juego, caracterizadas todas por deformaciones pequeñas: mayor flexibilidad —y, en consecuencia, mayor coeficiente de restitución—, y mejor y más rápido amortiguamiento de las vibraciones causadas por el golpeo fuera de centro, para el sentido agradecimiento de los tenistas imperfectos.

Vale decir, acaso, que desde el punto de vista del ingeniero civil, del estudioso del estado sólido y del químico, la ciencia de materiales resulta de interés en cuanto concierne a materiales bien portados en situaciones estáticas o casi perfectamente elásticas.

Los reólogos, en cambio, gozan de la nada sutil perversion de la deformidad. El propio nombre de la disciplina los delata: el vocablo *reología* fue acuñado por Eugene Cook Bingham —¡un químico!— en 1928, siguiendo la máxima de Heráclito, *παντα ρει*, “todo fluye” (Reiner, 1964).

(La historia, por cierto, es curiosa. Reiner, un ingeniero civil venido de Palestina a Pennsylvania a trabajar con Bingham, sostuvo con éste las pláticas que llevaron a la fundación de la reología. Bingham, consciente de que la química de coloides adquiriría relevancia prontamente, sostenía que hacía falta establecer una rama de la física que se ocupase de los problemas interdisciplinarios que los habían hecho colegas a ellos mismos. Reiner sugirió que tal disciplina existía ya: la mecánica del medio continuo. Pero Bingham advirtió que semejante designación espantaría a los químicos y nació la reología.)

La reología se entiende, pues, como la rama de las ciencias exactas que se ocupa de estudiar el flujo y la deformación de la materia. Como tal, incluye a la mecánica de fluidos, y no excluye a los sólidos, como ilustra el caso de los vitrales.

Mirado desde un punto de vista pragmático, busca el entendimiento de las propiedades útiles de los materiales en estado de deformación, y luego de ésta.

Una buena forma de aproximarse a las implicaciones de esta búsqueda es partiendo de materiales dóciles. Los sólidos elásticos —hule, barras de metal, muchos plásticos solidificados— obedecen la ley de Hooke:

$$F = k(x - x_0)$$

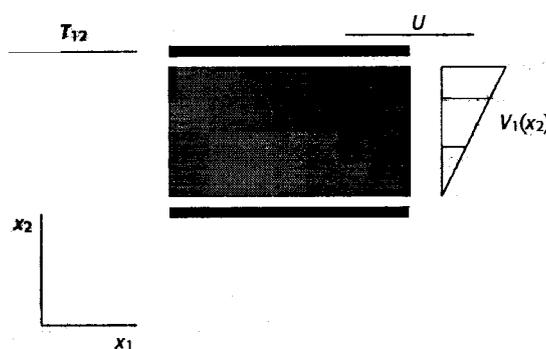
que describe la respuesta del material, en la forma

de su fuerza de resistencia,  $F$ , ante una deformación  $x$  a partir de su posición de equilibrio mecánico,  $x_0$ .

En el otro extremo, los líquidos newtonianos —agua, aceites— siguen la ley de viscosidad de Newton,

$$T_{12} = \eta \frac{dv_1}{dx_2}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad del fluido entre dos placas paralelas infinitas (como muestra la figura), y  $T_{12}$  es el esfuerzo con que hace falta empujar la placa superior para inducir un flujo caracterizado por la velocidad  $v_1$ , dependiente de la coordenada  $x_2$ , en el fluido:



La placa superior se mueve, impulsada por el esfuerzo  $T_{12}$ , con velocidad  $U$ , arrastrando al fluido en contacto con ella. Éste se deforma (fluye) en la dirección de  $U$ , pero lo hace progresivamente menos conforme más lejos está de la placa en movimiento, hasta llegar a la placa fija, donde la velocidad es cero.

Hay cierto parecido entre las leyes de Hooke y Newton: ambas describen la respuesta de un material sometido a esfuerzo, y, en consecuencia, a deformación. Pero la ley de Hooke relaciona la fuerza con un desplazamiento, y la de Newton relaciona un esfuerzo —que es fuerza por unidad de área— con una medida de la rapidez de deformación.

### Espejito, espejito...

Lo cual nos trae al meollo del asunto: la descripción de la deformación.

Describir la deformación de un cuerpo puede no ser un problema trivial. Si se trata de cuerpos sólidos, la cosa es relativamente simple, porque aquéllos están caracterizados por el cómodo hecho de que las posiciones relativas de sus partes constituyentes —podemos imaginar que el cuerpo está dividido en cubos de tamaño diferencial, cada uno con un centro geo-

métrico al cual le corresponden tres coordenadas espaciales— permanecen constantes. Si se deforma, lo hace poco con respecto a estas posiciones relativas, y son pocas las componentes que participan en la deformación.

Los fluidos, en comparación, son un cotorreo sin medida. No hay tal restricción como la constancia de las posiciones relativas, al grado de que, incluso si macroscópicamente parece que está en reposo, a escala coloidal nada está quieto, y aquéllo es un guateque de colisiones sin orden ni concierto (Atkins, 1982).

Más aún, la definición propia de un fluido es la de un material incapaz de resistir esfuerzos tangenciales sin ceder a la deformación. De modo que el problema de *describir* deformaciones es inherente a la naturaleza misma de los fluidos.

Valdría preguntarse en qué estaba pensando Bingham al sugerir que *reología* espantaría a los químicos menos que *medio continuo*, porque de todas formas es inescapable una dosis aplastante de matemáticas más o menos antipáticas para pasar este escollo. La razón es simple: no tiene sentido, en este contexto, jugar a colocarle banderitas de posición a cada pedacito constituyente del fluido y luego seguir los pedacitos durante la deformación, porque ésta no es para nada pequeña en el sentido en que sí lo es la del sólido elástico.

Este detalle tiene una trascendencia enorme.

Si uno lidia, por ejemplo, con dos sólidos elásticos, digamos que capaces de sostener entre ellos algún tipo de interacción a distancia —mediante un potencial electromagnético o gravitatorio— y de protagonizar colisiones, la forma de describir el sistema a cabalidad es resolviendo la segunda ley de Newton para cada cuerpo, y resolviendo el sistema de dos ecuaciones diferenciales que resulta. (Nótese que las ecuaciones están acopladas por el término de interacción potencial a distancia.)

Esto es factible en virtud de que a cada sólido podemos asociarle masa y posición, para poder escribir

$$F = ma$$

por seguir lo que haría un estudiante de secundaria.

Ahora bien, si admitimos que es inútil pensar en seguir la deformación del fluido en términos de las trayectorias de sus componentes, como sí lo hacemos con los cuerpos sólidos, ¿cómo diablos escribir la ley de Newton?

Pues recurriendo, para horror de Bingham, a la mecánica del medio continuo. En ella, uno comienza por renunciar a toda noción de partícula, cambia las masas puntuales por una función continua de densidad, trueca las sumatorias por integrales de volumen y echa mano, con gula insaciable, del teorema de la divergencia, cual obseso.

El resultado de manosear así la segunda ley de Newton es la ecuación de balance de momento lineal, antesala de las célebres ecuaciones de Navier-Stokes (Whitaker, 1984).

El punto interesante de todo esto es que la situación está enredada justamente a causa de la dificultad de *describir la deformación* de un sistema no formado por partículas discretas sino por un medio continuo. Para mayor horror de los carentes de inclinaciones matemáticas, todas las opciones útiles de descripción más o menos general recurren a itensores!, vecinos cercanos del concepto mismo de lo intratable (Segel, 1977).

### De regreso a la juguetería

Por más árido y complicado que pueda sonar lo anterior, hablamos de ciencia previa al siglo XX. La cosa puede llegar a ponerse aún más exótica.

Permítaseme sugerir el tercer experimento para despistados: tomar una bola de esa especie de masticque conocido como *silly putty* —mezcla de ácido bórico con aceite de silicón—, y dejarla bien quieta sobre una mesa, largo rato. Digamos 40 minutos. Acto seguido, reconstrúyase la bola y arrójese contra la misma mesa.

Nótese que debe haber habido la necesidad de *reconstruir* la bola, pues los 40 minutos que estuvo quietecita, sin que nadie la tocara siquiera, habrán bastado para deformarla al punto de hacer insospechable su forma original. ¿Por qué? A causa del esfuerzo tangencial ejercido por la atracción gravitacional sobre las partes de su superficie con alguna proyección vertical.

Dado, pues, que no pudo resistir esfuerzos tangenciales, debe concluirse que la *silly putty* es un fluido.

Lo malo es que tal conclusión queda contradicha por la experiencia del rebote, casi perfectamente elástico, que se obtiene al arrojar la bola contra la misma mesa donde minutos antes se deformó líquidamente.

¿Otro caso de un material con personalidad doble?

Más que eso, de hecho. En este caso ilustramos

un material que ante un esfuerzo (la gravedad) presenta una respuesta predominantemente viscosa (se escurre), y ante otro esfuerzo (la colisión contra la mesa), ofrece una respuesta elástica (rebota).

Esta clase de materiales, llamados *viscoelásticos*, pertenecen a un tipo de líquidos que, por no comportarse de acuerdo con la ley de viscosidad de Newton, reciben el nombre de *no Newtonianos*.

Son, por cierto, los que pueden hacer despertar a los químicos, pues incluyen a los plásticos, las soluciones poliméricas, las suspensiones coloidales y casi todos los líquidos fisiológicos, empezando por la sangre (Leyton, 1975).

Modelarlos ha sido el pasatiempo favorito de los reólogos, y particularmente de los ingenieros químicos. Hacerlo supone enfrentar ya no sólo el problema de la descripción de la deformación, sino de relacionar a ésta con los esfuerzos aplicados en formas más complejas que la simple respuesta lineal de la ley de viscosidad de Newton.

En este punto, el campo se partió en dos. Por un lado, los modelos basados exclusivamente en el análisis cinemático desde la óptica de la mecánica del medio continuo (Malvern, 1969).

Y por otro (Bird, 1987), las relaciones entre esfuerzo y deformación derivadas de considerar las interacciones específicas entre las macromoléculas en solución, y entre éstas y las moléculas del líquido disolvente (Flory, 1990). El punto de partida aproxima a las cadenas poliméricas como sistemas mecánicos compuestos por resortes y canicas conectados en sucesión y sometidos al flujo del disolvente. Los cálculos de esfuerzo resultan de aplicar los métodos de la Mecánica Estadística para hacer promedios, visto que el número de polímeros por unidad de volumen del fluido es astronómico.

### La estética de lo deforme

Lo que resulta de tantas vías de modelaje no es un manojo de unas cuantas ecuaciones, pocas, claras y ampliamente poderosas, sino algo más cercano a una fauna de modelos de comportamiento reológico con diversos rangos de aplicación, dependiendo, sobre todo, de qué material se trate y de la forma del régimen de deformación que interese (Bird, 1995).

Para hacer las cosas aún más apasionantes, sucede que los fluidos no Newtonianos se entretienen con uno, mostrando una batería de trucos y gracejos inimaginables para los Newtonianos (Larson, 1998; Boger, 1993), y que incluyen grandes variaciones de

la viscosidad —incluso a temperatura constante— sorprendentes manifestaciones de la naturaleza elástica del material, aparición inopinada de inestabilidades y flujos secundarios aun en las condiciones geométricas más inocentes, y otros fenómenos que todavía tienen a los reólogos del planeta rascándose el cuero cabelludo.

Pero vale la pena reparar, volviendo al punto de partida de este recuento, en que el primer elemento de separación entre los materiales que uno puede admirar quietecitos en estadios colosales, puentes colgantes que dan vértigo de largos o fuselajes de aeronaves alucinantes, por un lado, y todas las soluciones poliméricas, plásticos en extrusión, fluidos granulares y líquidos fisiológicos, por otro, es el hecho de que las propiedades interesantes de estos últimos aparecen sólo en la medida en que se les abofetea, se les empuja, se les presiona o se les raspa sin delicadeza.

La belleza que unos exhiben en su configuración estática, la tienen los otros cuando están más deformes. ■

### Referencias

- Atkins, P.W. y Clugston, M.J., *Physical Chemistry*, Pitman, 1982, p. 91.
- Bird, R.B., Hassager, O., Armstrong, R.C. y Curtiss, C.F., *Dynamics of Polymeric Liquids*, John Wiley & Sons, 1987.
- Bird, R.B., Constitutive equations for polymeric liquids, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 27, 169-193, 1995.
- Boger, D. y Walters, K., *Rheological phenomena in focus*, Elsevier, 1993.
- Flory, P.J., *Principles of Polymer Chemistry*, Cornell University Press, 1990, p. 603.
- Leyton, L., *Fluid behavior in biological systems*, Clarendon Press, 1975.
- Malvern, L.E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice Hall, 1969.
- Plumb, R.C., Antique windowpanes and the flow of supercooled liquids, *J. Chem. Education*, 66(12), 994-996, 1989.
- Reiner, M., Deborah Number, *Phys. Today*, 62, 1964.
- Segel, L., *Mathematics applied to Continuum Mechanics*, Dover Publications, 1977.
- Whitaker, S., *Introduction to Fluid Mechanics*, Krieger Publishing Co., 1984, p. 153.
- Zanotto, E., Do cathedral glasses flow?, *Am. J. Phys.*, 66 [5], 392-395, 1998.