

## AGRADECIMIENTOS

En julio de 2003 se organizó en el Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV) un curso monográfico de Introducción a la Reología, en colaboración con la empresa ThermoHaake GmbH y su representación en España, Instrumentos Físicos Ibérica, S.L. El éxito del evento, con unos 50 asistentes, me impulsaron a plasmar por escrito el material que había ido preparando a lo largo de los años sobre reología de suspensiones cerámicas para los diversos cursos que había impartido, fundamentalmente en Iberoamérica. El interés suscitado entre estudiantes, profesores y técnicos, y la excepcional acogida de que he sido objeto en mis visitas a algunos países de América Latina, me persuadieron de la necesidad de disponer de un texto de reología sencillo, ordenado y riguroso que sirviera de referencia para el sector cerámico de habla hispana. Seguramente no he conseguido esos dignos objetivos, pero el hecho de que sea el primer libro de reología en español espero que sienta las bases para ulteriores esfuerzos, míos y de otros colegas más dotados y más expertos en el tema.

Obviamente, la información que se recoge en esta obra, cuyo cuerpo central estaba listo en pocos meses, es fruto de largos años de experiencia acumulada durante mi carrera y enriquecida por todos aquellos con los que tuve la suerte de trabajar. Mis primeras palabras de agradecimiento se dirigen, pues, a los que iniciaron mi formación; el primero, el Prof. Vicente Fernández, que me dio clases durante varios años en la Facultad de Ciencias de la UAM y que, hasta la fecha, ha seguido enseñándome a dignificar el trabajo de la Ciencia.

En segundo lugar, cronológicamente, deseo expresar mi agradecimiento a los que abordaron la dura tarea de iniciarme en el procesamiento cerámico, el Dr. Joaquín Requena y el Prof. J. Serafín Moya, ambos en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid en la actualidad. De uno aprendí la necesidad de establecer una metodología para el trabajo experimental; del otro apreheñí la motivación y la belleza que encierran las ideas más simples.

En tercer lugar, pero no menos importante, mi agradecimiento se dirige a los colegas surgidos durante mi andadura profesional y, de forma muy especial, a

aquellos con los que compartí tantas horas de trabajo ilusionado, discusiones acaloradas y aprendizaje renovado. Los doctores Javier Sánchez, Sonia Mello Castanho, Begoña Ferrari, Carlos A. Gutiérrez, Arnaldo J. Millán, Yolanda Castro, M<sup>a</sup> Isabel Santacruz y Nicolás Hernández, con sus trabajos de Tesis, a menudo insondables para mi escaso entendimiento, han sido, sin duda, mis mejores maestros. Además de introducirme en campos nuevos y enseñarme casi todo lo que sé, me forzaron a plantear nuevos desafíos y evitaron que me vapuleara la desidia. Pero lo que más aprecio es la entrañable amistad que me une a ellos.

El apoyo incondicional de los compañeros del grupo de trabajo ha sido, y sigue siendo, mi mayor estímulo. Mi agradecimiento a la Dra. M<sup>a</sup> Isabel Nieto por tener la paciencia de revisar el original y por sus sugerencias y comentarios. Vaya también mi agradecimiento a mis colegas más jóvenes, cuyo soplo de juventud e ilusión es un continuo aliciente para seguir en la brecha. Y a todos los que, con estancias breves en el laboratorio, me han aportado ideas frescas y nuevas inquietudes.

Por otra parte, deseo agradecer al Prof. Salvador de Aza su entusiasmo y apoyo a este libro y su disposición para prologarlo.

También es de agradecer el apoyo proporcionado en todo momento por la empresa ThermoHaake y, en particular, a Roberto Steinbrüggen, de Instrumentos Físicos Ibérica, S.L., que además del apoyo logístico, se prestó amablemente a revisar la parte de reometría, dándome interesantes sugerencias y consejos. Igualmente, agradezco a la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio su interés y participación activa en la edición del libro.

Finalmente, mis agradecimientos para mi familia, que ha soportado con ejemplar paciencia mi abstracción en horas diurnas y el monótono ruido del teclado del ordenador en las nocturnas. También mis hijos me han ayudado activamente, recogiendo cuidadosamente las hojas que escupía la impresora cuando imprimí la primera versión del libro.

Y, por supuesto, mi agradecimiento final al posible lector de este libro, que espero encuentre en él, si no la respuesta a sus problemas e inquietudes, al menos el camino para abordarlos.

En Madrid, a 10 de marzo de 2005  
El autor

## PRÓLOGO

Cuando el Prof. Moreno me propuso escribir el prólogo de su libro fue una sorpresa y al mismo tiempo una satisfacción personal muy agradable, pues me trajo a la memoria días ya idos de responsabilidad al frente del Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). En aquellos días, debatíamos sobre las acciones a tomar en la línea de las denominadas “cerámicas avanzadas” y “cerámicas funcionales”. En el ICV se tenía cierta experiencia en procesos de conformado por prensado y extrusión, sin embargo el procesado o conformado de materiales cerámicos por “colaje”, usual en la cerámica sanitaria, de vajilla y ornamental, no había sido contemplado como línea de trabajo con posibilidades de futuro. Personalmente creía, y aún mantengo, que para el procesado y manufactura de polvos cerámicos y piezas complejas el proceso de “colaje” podía permitir abordar con éxito los retos que planteaban los nuevos materiales cerámicos.

Con su llegada al ICV se decidió afrontar, por primera vez, una tesis doctoral sobre el comportamiento reológico de suspensiones cerámicas. Desde entonces, el hoy Prof. Moreno, ha trabajado con ahínco y tesón en comprender los fenómenos complejos que determinan el comportamiento de las partículas cerámicas en suspensión, no solo en un medio acuoso sino también en otros medios líquidos. Fruto de su gran esfuerzo y dedicación han sido gran número de trabajos, en dicha línea de investigación, publicados en revistas científicas de alto impacto, que han merecido gran cantidad de citas en la literatura científica así como diversas patentes. Su dedicación le ha llevado a dirigir diversas tesis doctorales, logrando formar y liderar en el ICV un amplio grupo de trabajo en el complejo mundo de la reología. Adicionalmente, ha encontrado tiempo, quitándoselo al descanso nocturno, para presentarnos la presente obra.

Aunque la reología es una ciencia compleja con una fuerte base matemática, su estudio se ha extendido enormemente en los últimos años hasta formar parte de la práctica cotidiana, no solo en el sector cerámico sino también en muchos otros sectores tecnológicos, desde pinturas, cosméticos, alimentación, farmacia, biotecnología, etc. La tremenda expansión de la reología ha hecho que seamos muchos los que la utilizamos y pocos los que se dedican al estudio de sus fundamentos.

En el sector cerámico, la reología es una herramienta básica de estudio y caracterización de suspensiones, que se emplean masivamente en la práctica no solo para el conformado por vía húmeda, como el “colaje” y técnicas derivadas de ésta, sino también en procesos de molienda y mezclado, preparación de polvos para prensado en seco, como la atomización, o la preparación de engobes y esmaltes así como de hormigones.

El sector cerámico ha comprendido la importancia fundamental del control de las propiedades reológicas de sus formulaciones de cara a la obtención de materiales con mayor homogeneidad microestructural, con menos defectos y mayor reproducibilidad.

Sin embargo, pese a la importancia de su estudio, la reología no suele estar incluida en programas docentes españoles, con salvas excepciones y, lo que es mas importante, no se han publicado libros en castellano que ofrezcan una visión global de los fundamentos de la reología y la interpretación de las medidas reológicas. En este contexto, el libro, que el Prof. Moreno nos presenta, trata de cubrir el hueco existente y sembrar una semilla que estimule su estudio y aplicación con rigurosidad.

Dada la formación del autor en el campo del procesamiento cerámico, el texto se centra en la reología de suspensiones, lo que hace necesario reforzar los aspectos específicos que la diferencian de otros sistemas. Las suspensiones cerámicas son sistemas complejos en los que la fase sólida, las partículas, pueden interactuar entre si o interactuar con las moléculas del medio de dispersión o con las sustancias empleadas como aditivos de procesamiento. Esto hace que, en general, las suspensiones cerámicas se comporten como fluidos complejos con una estabilidad limitada en el tiempo. Esto dificulta en muchos casos la medida experimental del comportamiento reológico y la interpretación de los resultados obtenidos. Un caso típico es el de las medidas de oscilación que, a menudo, requieren tiempos de medida prolongados durante los cuales puede producirse la desestabilización de la suspensión, limitando su aplicación

El libro consta de siete capítulos y ocho apéndices. Es, en principio, un libro de texto y va dirigido al sector cerámico, siendo útil para técnicos y científicos así como para estudiantes. Sin embargo, dado que en la obra se introducen los conceptos generales de la reología, el equipamiento básico y su aplicación en suspensiones, el libro es también válido para otros sectores ya citados previamente, además, por supuesto, de la ciencia y tecnología de materiales. Por lo tanto, estudiantes y profesores de estas áreas pueden encontrar en este libro un referente para la docencia y la investigación.

Profesor Dr. Salvador de Aza  
Madrid, marzo de 2005

## 1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

### 1.1. Definición

El término **reología** ha entrado a formar parte del vocabulario habitual en multitud de disciplinas y áreas tecnológicas, entre las que el sector cerámico no es una excepción. La reología es una de las pocas materias cuya génesis tiene lugar en una fecha exacta: el 29 de abril de 1929. En esa fecha, y durante el transcurso del Tercer Simposio de Plasticidad, se decidió crear una organización permanente (“The American Society of Rheology”) para el desarrollo de una nueva disciplina cuyo objetivo era el estudio del flujo y deformación de todas las formas de la materia. El nombre reología fue propuesto por Bingham y Reiner basándose en la célebre máxima de Heráclito “ $\pi\alpha\nu\tau\alpha\ \rho\epsilon\iota$ ”, “panta rhei” (todo fluye). La palabra **reología**, por tanto, está formada por las raíces “rheo” (flujo, corriente) y “logos” (estudio), es decir, estudio del flujo.

La definición aceptada por la IUPAC es la siguiente: “**Reología**: estudio del flujo y deformación de la materia bajo la influencia de una fuerza mecánica. Se refiere, especialmente, al comportamiento de material que no puede describirse por los modelos lineales simples de la hidrodinámica y elasticidad. Algunas de estas desviaciones son debidas a la presencia de partículas coloidales o a la influencia de superficies”.

Por extensión, se define la **reometría** como la determinación experimental de las propiedades reológicas. Tradicionalmente, éstas se circunscribían al comportamiento de flujo, pero en la actualidad, y gracias al progreso experimentado en las técnicas de medida, esta definición debe extenderse también a la medida de las propiedades viscoelásticas y a la determinación del flujo extensional.

Sin embargo, la palabra reología no aparece en el DRAE (Diccionario de la Real Academia Española), pero sí aparece el registro **reómetro**, con los siguientes significados:

- 1) instrumento que sirve para medir las corrientes eléctricas, y
- 2) aparato con que se determina la velocidad de una corriente de agua.

El diccionario de María Moliner repite los mismos significados para el término reómetro pero tampoco se hace eco del vocablo reología. Lo mismo sucede con los editores de textos más comunes, cuyos diccionarios se empeñan en sustituir la palabra reología por *teología* (y en cualquier idioma, para más inri, nunca mejor dicho).

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), en el apartado de estudio y caracterización de materiales plásticos poliméricos, define la reología como la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia. El Diccionario Esencial de las Ciencias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales define la reología como “el estudio de la deformación y el flujo de la materia, especialmente el flujo de fluidos no newtonianos y el flujo plástico de sólidos”.

## 1.2. Evolución histórica

El origen de la reología hay que buscarlo en los fundamentos de la mecánica clásica, cuyo origen data de la Grecia clásica, siendo, por tanto, una de las ciencias físicas más antiguas. En la *Tabla 1.1* se recogen los precedentes más significativos que han marcado la evolución de la reología, que servirán de base para la discusión posterior.

Los materiales ideales pueden clasificarse en cuatro grupos generales:

- 1) **Sólido rígido perfecto.** La mecánica clásica trata de cuerpos ideales euclidianos en los que solo la masa (o la densidad) es relevante y que no sufren deformación. Esta es la base de las leyes de la mecánica de Newton, publicadas en 1687 en el libro “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*”.
- 2) **Sólido elástico ideal.** Fue Robert Hooke, en 1678, quien primero describió la respuesta mecánica de un sólido sometido a una deformación. Así, en su libro “*True Theory of Elasticity*”, Hooke postulaba que la potencia de un muelle era proporcional a la tensión aplicada. Dicho de otra forma, al duplicar el esfuerzo ( $\sigma$ ) se duplicaba la deformación ( $\gamma$ ). Young demostró que la constante de proporcionalidad (módulo elástico o módulo de Young) era una propiedad intrínseca del material. Cauchy planteó la primera ecuación fundamental de la elasticidad en 1827, basándose en los trabajos previos de Navier, Coulomb y Poisson.
- 3) **Fluido aviscoso.** Se definen así aquellos fluidos que no ofrecen resistencia al flujo. Fue Pascal, en 1663, quien estableció que la presión en un líquido es igual en todas las direcciones. Posteriormente, surgió el campo de la hidrodinámica, que trata del movimiento de fluidos en los que no hay efectos de viscosidad, cuyo desarrollo fue posible merced a los trabajos de Bernoulli (1738) y Euler (1755).

**Tabla 1.1**

Trabajos que han marcado la evolución de la reología.

Clase de fluidos/modelos		Época	Trabajos representativos
Material Ideal	Cuerpo rígido Sólido elástico Fluido de Pascal	Antigüedad s.XVII s. XVIII	Arquímedes, Newton (1687) Hooke (1678), Young (1807) Pascal (1663), Bernouilli (1738), Euler (1755)
	Líquido newtoniano	ss.XVIII-XIX	Newton (1687), Navier (1823), Stokes (1845), Hagen (1839), Poiseuille (1841)
Viscoelasticidad lineal		Mediados s.XIX	Weber (1835), Maxwell (1867), Poynting & Thomson (1902)
Líquidos newtonianos generalizados		s.XIX-s.XX	Trouton & Andrews (1904), Bingham (1922), Ostwald (1925), De Waele (1923), Herschel-Bulkley (1926)
Viscoelasticidad no lineal		s.XX	Poynting (1913), Zaremba (1903), Jaumann (1905), Hencky (1929)
Descripción clave de materiales	Suspensiones Polímeros Viscosidad extensional	Principios s.XX	Einstein (1906) Bakeland (1909), Staudinger (1920) Trouton (1906), Tamman & Jenckel (1930)
Génesis de la reología		1929	Bingham, Reiner y otros

- 4) **Líquido newtoniano**. Newton desarrolló sus leyes para cuerpos rígidos en su “Principia Mathematica”, introduciendo un corolario en donde describía el comportamiento mecánico de un líquido. Según Newton, la resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido era proporcional a la velocidad a la que se separan entre sí. Es decir, al duplicar la tensión aplicada a un líquido, se duplica el gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ). Nace así el término **coeficiente de viscosidad** o, simplemente, **viscosidad**, que da cuenta de la fricción interna que experimentan las capas de líquido según un régimen laminar. Hagen (1839) hizo el primer estudio de viscosidad de líquidos y estableció que la caída de presión para el flujo capilar era la suma de un término de viscosidad y una corrección de energía cinética. Poiseuille (1841) realizó estudios empíricos de capilaridad en tubos estrechos, observando que la velocidad

de flujo era proporcional al gradiente de presión y a la cuarta potencia del radio. Las leyes del movimiento de fluidos reales las establecieron Navier (1823) y Stokes (1845). La conocida ecuación de Navier-Stokes permite predecir las distribuciones de velocidad y flujo entre cilindros rotacionales y tubos cilíndricos. Couette (1890) mostró que la viscosidad medida con un aparato de cilindros concéntricos y con flujo en un tubo eran iguales, demostrando que la viscosidad es una propiedad intrínseca del material.

Aunque por definición la reología describe el comportamiento al flujo de todo tipo de material, su mayor interés reside en el estudio de materiales con relevancia industrial con propiedades intermedias entre el sólido rígido perfecto y el fluido de Pascal. Por tanto, la reología se centra en los otros dos tipos de materiales ideales, el sólido elástico y el fluido newtoniano, así como en la amplia gama de materiales con propiedades intermedias entre las de aquellos.

Las leyes establecidas por Hooke y Newton, nacidas del estudio de la respuesta elástica de sólidos y la respuesta viscosa de líquidos, respectivamente, fueron consideradas leyes universales durante dos siglos, en los que no se produjo ningún cambio sustancial.

En el s.XIX, Weber, siguiendo los pasos iniciados dos siglos antes por Hooke sobre el comportamiento elástico de sólidos, realizó experimentos de deformación con hilos de seda. Weber (1835) observó que al aplicar una carga longitudinal se producía una extensión inmediata del hilo, seguida de un posterior alargamiento con el tiempo. De igual forma, al eliminar la carga, tenía lugar una contracción inmediata, seguida de una contracción gradual hasta alcanzar la longitud inicial. El comportamiento descrito corresponde a una respuesta elástica distorsionada con elementos asociados a la respuesta de un líquido. Por otra parte, Maxwell (1867) desarrolló un modelo matemático para describir fluidos que, a su vez, presentan ciertas propiedades elásticas, esto es, elementos asociados a la respuesta de un sólido.

Estos dos modelos constituyen el origen de la **viscoelasticidad**. En el primero se considera que un sólido elástico puede comportarse como un fluido viscoso. En el segundo, por el contrario, es el fluido viscoso el que puede tener elementos de comportamiento elástico (sólido).

Todos los modelos reseñados hasta ahora son **lineales** (Tabla 1.2), lo que supone una proporcionalidad directa entre la carga aplicada y la deformación o la velocidad de deformación producida. Es ya entrado el s.XX cuando cobra importancia la **no-linealidad**, apareciendo modelos que asumen que propiedades tales como el módulo de rigidez o la viscosidad pueden variar con el esfuerzo aplicado. En los modelos reológicos no lineales, al contrario de lo que ocurre en los fluidos newtonianos, la viscosidad depende del gradiente de velocidad, lo que da origen a dos tipos de comportamiento reológico, según la viscosidad de la sustancia



disminuya al aumentar la velocidad de cizalla (caso de sustancias fluidificantes), o aumente con la velocidad de cizalla (sustancias espesantes). Además, aparecen los primeros modelos que consideran el tiempo como una variable más a tener en cuenta. Así, en ensayos reológicos en los que el ciclo de subida no coincide con el de bajada, se habla de *tixotropía*.

En la figura 1.1 se muestran imágenes de los padres de la reología.



**Fig. 1.1.** Los padres de la reología: de izquierda a derecha, Hooke, Newton (arriba), Weber y Maxwell (abajo).

**Tabla 1.2**

Leyes lineales de comportamiento reológico

LEYES LINEALES	COMPORTAMIENTO
<u>Flujo/Deformación</u> Hooke (1678) Newton (1687)	Elástico (sólidos) Viscoso (líquidos)
<u>Viscoelasticidad</u> Weber (1835) Maxwell (1867)	Sólidos con respuesta asociada a líquidos Líquidos con respuesta asociada a sólidos

En las primeras décadas del s.XX se comienzan a definir otros parámetros reológicos, como el punto de flujo o la plasticidad, que aparecen en el modelo lineal de Bingham en 1922. Empiezan a proponerse ecuaciones para describir un comportamiento de flujo no lineal (dependiente de la velocidad de cizalla), como son la de Ostwald (1925)-de Waele (1923) y la de Herschel-Bulkley (1926) a la que siguen otros modelos de uso generalizado, como el de Casson (1956), ya en la segunda mitad del s.XX.

También en los inicios del s.XX comienzan a desarrollarse los primeros modelos de viscoelasticidad no-lineal. Los primeros trabajos sobre este tema son los de Zaremba (1903), Jaumann (1905) y Poynting (1913)

En función de lo anterior, los materiales reales pueden presentar un comportamiento puramente elástico, como un sólido, un comportamiento puramente viscoso, como un líquido, o una combinación de ambos, es decir, un comportamiento viscoelástico. Desde una perspectiva más general, cabe pues decir que, en realidad, todos los materiales son viscoelásticos, donde los cuerpos elásticos “puros” y los cuerpos viscosos “puros” no son sino los extremos de una vasta gama de posibilidades.

Esta combinación de propiedades intrínseca a la materia conduce inexorablemente a la pregunta: ¿Tal sustancia es un sólido o un líquido?. La respuesta menos comprometida es que depende de la tensión aplicada y de su duración. De esta forma, la clasificación del comportamiento reológico de un material debe ser ampliada con la introducción de una escala de tiempo relacionada con el proceso de deformación. Este factor de tiempo fue introducido por primera vez en 1945 por Reiner, que definió el llamado *número de Deborah*,  $D_e$ , como la relación:

$$D_e = \tau/T \quad (1.1)$$

en donde  $\tau$  es un tiempo característico del material y  $T$  es un tiempo característico del proceso de deformación. Un sólido elástico posee tiempos característicos muy largos ( $\tau \rightarrow \infty$ ), por lo que el número de Deborah es elevado. Por el contrario, en un líquido viscoso  $\tau \rightarrow 0$ , (para líquidos como el agua,  $\tau = 10^{-12}$  s) y los valores de  $D_e$  son bajos.

Este parámetro hace alusión al personaje bíblico, que en cierto pasaje del Antiguo Testamento declara que “si se espera el tiempo suficiente, todo fluye, hasta las montañas”. ¿Será esta alusión la culpable de que al teclear la palabra reología el ordenador quiera sustituirla inmediatamente por teología?

Como ejemplo de lo anterior, Schramm escribe lo siguiente. “Las famosas vidrieras de la Catedral de Chartres, en Francia, han fluido (*sic*) desde que se

fabricaran hace unos 600 años. Los panes de vidrio tenían un espesor uniforme de arriba abajo en la época medieval, pero hoy día las moléculas de vidrio han fluído por efecto de la gravedad de manera que el espesor en la parte superior es fino como el papel, mientras que los panes inferiores tienen el doble de espesor”. Así pues, se puede constatar que el vidrio sólido, pese a tener un tiempo característico largo (número de Deborah pequeño), si se emplea una escala de tiempo adecuada, puede considerarse como un fluido. Todo consiste en tener tiempo suficiente... ¡y armarse de paciencia!.

Esta idea del devenir de las cosas no es nueva; constituye la base del pensamiento de Heráclito de Efeso, allá por el s.VII a. de C, quien atribuía ese continuo fluir de las cosas a la *lucha de propiedades contrarias*. Quien haya tratado de preparar una suspensión de bentonita con una fracción en volumen de, digamos, “sólo” 0,10, entenderá esta idea perfectamente.

Siguiendo esta argumentación, Barnes y Walters revolucionaron la reología moderna en 1985, con un trabajo titulado “¿El mito del punto de flujo?”, en el que, de acuerdo a la escala de tiempo introducida por Reiner, negaban la existencia de un esfuerzo crítico o punto de flujo. Desde una perspectiva teórica podemos asumir la no-existencia del punto de flujo. Sin embargo, desde el punto de vista de ingeniería de procesos, en donde el tiempo es un factor limitante, dicho punto de flujo sigue siendo una estrategia útil para caracterizar la respuesta al flujo de una sustancia.

Tras el auge de la no-linealidad, en la segunda mitad del s.XX se producen cambios revolucionarios en las leyes de la reología. Por una parte, hay un cambio notable en lo que se refiere al desarrollo de equipos experimentales más precisos y de menor costo, que posibilitan el uso masivo de técnicas reométricas que antes no eran viables. Así, cabe destacar la creciente popularidad de instrumentos de laboratorio, precisos y relativamente económicos, que permiten realizar medidas en modo de esfuerzo o de deformación controlados, lo que ha permitido conocer la curva de flujo general, teniendo en cuenta valores de velocidad de cizalla extremos. En las décadas de los 60 y 70 surgen diversos modelos para describir la curva de flujo general, entre los cuales cabe mencionar los de Sisko (1958), Cross (1965) y Carreau (1972), entre otros. A partir de los modelos simples que emplean 2-parámetros, surgieron modelos que hacen uso de 4-parámetros para describir la curva de flujo general. Dichos parámetros son la viscosidad (a una velocidad de cizalla determinada), la velocidad de cizalla, la viscosidad límite (definida como el valor de viscosidad extrapolado a una velocidad de cizalla nula, o sea, en reposo) y el valor de viscosidad extrapolado a una velocidad de cizalla infinita.

Asimismo, han aparecido en el mercado diversos reómetros capaces de determinar el comportamiento viscoelástico de los materiales, lo que ha favorecido el auge de este tipo de estudios. En los últimos años, y de cara a materiales que se

pueden deformar fácilmente, como los elastómeros, está cobrando auge la reometría elongacional, que no se abordará en esta obra dada su escasa repercusión en las suspensiones cerámicas.

Gracias a estos avances, el uso de la reología se extiende a nuevas áreas de aplicación de creciente demanda, como las industrias de procesado de plásticos, fibras sintéticas, alimentación, farmacia, biotecnología, etc., cuyo desarrollo ha estado acompañado de una creciente implicación de la reología.

Tras su génesis en 1929, las aportaciones más relevantes en reología se pueden resumir en los siguientes puntos:

- 1) *Ecuaciones constitutivas*. Desarrollo de modelos diferenciales. Los primeros trabajos se centran en la descripción del flujo para aplicaciones industriales. En la segunda mitad del s.XX se usan modelos integrales que consideran que el esfuerzo en cualquier posición y tiempo depende de la historia previa de la deformación local. Se empiezan a describir fenómenos de relajación en polímeros reticulados (teorías de red) y aparecen las teorías de reptado en tubos y las teorías moleculares.
- 2) *Avances experimentales y caracterización reológica*. Se describe el flujo bajo cizalla y las condiciones de contorno de no deslizamiento, se empieza a estudiar el papel de los esfuerzos normales para diversas aplicaciones, se comienzan los estudios dinámicos de baja deformación, se estudia el fenómeno de tixotropía, se desarrolla la reología elongacional, así como la instrumentación adecuada para su estudio, etc.
- 3) *Estudio del comportamiento de materiales avanzados*, como los cristales líquidos, los materiales cerámicos, los materiales compuestos, etc. El interés por optimizar el procesamiento de materiales y los avances experimentados en la química de superficies y coloides fomentan el desarrollo de ecuaciones que describan la reología de suspensiones y permitan evaluar la estabilidad de las mismas en relación con los potenciales de interacción entre partículas. En 1949 se describen por primera vez los fluidos electroreológicos y magnetoreológicos, que sufren cambios drásticos en viscosidad al aplicar un campo eléctrico o magnético, lo que abre nuevas posibilidades de aplicación en electrónica, robótica, etc.
- 4) *Reología computacional*. A partir de 1960 aparecen estudios teóricos basados en técnicas como el método de elementos finitos o los métodos espectroscópicos, así como el modelado de dinámica molecular, en donde se trata de relacionar la microestructura con propiedades reológicas macroscópicas haciendo uso de la mecánica estadística.

## **Bibliografía complementaria**

1. H.A. Barnes, J.F. Hutton, K. Walters, “An introduction to rheology”, Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1989.
2. D. Doraiswamy, “The origin of rheology: A short historical excursion”, [www.rheology.org/dor/publications/rheology\\_b/jan02/origin\\_of\\_rheology.pdf](http://www.rheology.org/dor/publications/rheology_b/jan02/origin_of_rheology.pdf)
3. H. Markovitz, “The emergence of rheology”, *Physics Today*, 21 [4] 23-30 (1968).
4. G. Schramm, “A practical approach to rheology and rheometry”, Haake GmbH, Karlsruhe, Alemania, 1994.
5. R.I. Tanner, K. Walters, “Rheology: an historical perspective”, Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1998.