

Utilizando la reología para comprender el comportamiento de los alimentos

La industria de los alimentos ofrece una gama de productos más diversa que cualquier otra, y para una base de clientes extremadamente exigente. Típicamente, los productos requieren de un procesamiento y una manipulación cuidadosos. El rendimiento en términos de variables como la extensibilidad, la estabilidad, la tasa de disolución y los parámetros sensoriales como el sabor, la sensación en boca y el aspecto son claves. La elevada calidad también es fundamental y el desarrollo de producto es un proceso continuo.

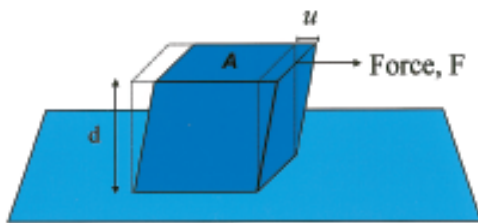


Figura 1: Definición de los términos de cizallamiento

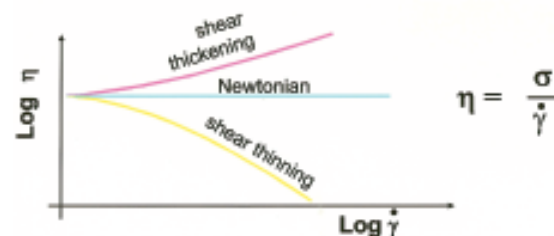


Figura 2: Curvas de viscosidad

Por lo general, los comestibles son dispersiones concentradas de partículas sólidas en un medio líquido o emulsiones y presentan un comportamiento que puede ser complejo y difícil de racionalizar. En este artículo, se exploran las formas en las cuales las mediciones reológicas pueden ayudar a los procesadores de alimentos a entender el comportamiento del producto y tratar el control de calidad (QC por sus siglas en Inglés), la calidad del producto y las cuestiones de procesamiento. Se definen las propiedades reológicas, y se ilustran los métodos de mediciones expuestos como así también la relevancia de la información producida con referencia a los ejemplos industriales. El artículo se centra en el uso de los reómetros rotativos.

¿Por qué medir las propiedades reológicas?

La reología es el estudio de la forma en la cual los materiales fluyen y se deforman cuando están sujetos a fuerzas externas. Por lo tanto, las propiedades reológicas como la viscosidad, la viscoelasticidad y el límite de fluencia cuantifican aspectos del comportamiento de los comestibles.

Control de calidad (QC) y desarrollo de producto

Muchos aspectos del rendimiento de los productos, incluyendo algunas variables sensoriales, pueden ser directamente correlacionados con las propiedades reológicas. Los mismos son medibles y pueden utilizarse para cuantificar el rendimiento del producto para el control de calidad (QC) o para aplicaciones relacionadas con el desarrollo de productos. Por ejemplo, la información reológica puede utilizarse para predecir propiedades como la sensación en boca o la tendencia de un material a pegarse en el paladar (una propiedad viscoelástica), la estabilidad de almacenamiento y la durabilidad.

En algunos casos, los estudios reológicos pueden, por lo tanto, utilizarse para complementar o reemplazar, paneles de degustación que requieren mucho tiempo o regímenes de prueba más complejos.

Además, la capacidad de estudiar sistemáticamente el impacto de los aditivos o los componentes del producto sobre un aspecto particular del rendimiento, optimiza el proceso de desarrollo del producto. En resumen, los análisis reológicos pueden ser una manera rentable de verificar la consistencia del producto, para el control de calidad (QC) y/o una herramienta útil para acelerar el desarrollo del producto.

■ ■ ■ Diseño del proceso

La información sobre la viscosidad se utiliza como rutina en el diseño de muchos artículos del equipamiento de proceso, incluyendo agitadores, tuberías, bombas e intercambiadores de calor, por lo tanto es necesario contar con valores apropiados para el diseño de cualquier equipamiento de proceso.

La comprensión de las propiedades reológicas también puede ayudar a los ingenieros en la evaluación de otros aspectos del diseño de proceso, y a determinar cómo se comportarán los productos nuevos en comparación con los materiales existentes.

■ ■ ■ Definición de las propiedades básicas

Para comprender la importancia de la información reológica, es necesario entender el significado de los términos básicos.

■ ■ ■ Esfuerzo de cizalla

El esfuerzo de cizalla es una medición de la cantidad de fuerza aplicada a la muestra y se define como fuerza dividida por el área sobre la cual está siendo aplicada (ver figura 1):

Esfuerzo de cizalla () = fuerza/área = F/A

■ ■ ■ Deformación por cizalla

La aplicación del esfuerzo de cizalla induce a una deformación que es cuantificada con el término deformación por cizalla. Se define como la extensión de la deformación dividida por la altura o espesor de la muestra: Deformación por cizalla () = deformación/altura =

■ ■ ■ Velocidad de deformación en cizalla

Para definir la velocidad de deformación en cizalla el esfuerzo debe estar en crecimiento continuo. Es la velocidad del cambio del esfuerzo con el tiempo. Velocidad de deformación en cizalla () = cambio en esfuerzo/cambio en tiempo = dy/dt

La velocidad de deformación en cizalla a la cual un material está sujeto puede variar drásticamente según la forma en la cual esté siendo utilizado.

Por ejemplo, una muestra almacenada en un estante está sujeta a velocidades de deformación en cizalla muy bajas en comparación con una que está siendo agitada o mezclada.

Viscosidad



La viscosidad es una medición de la resistencia del líquido a fluir, por eso es tan importante para el diseño del proceso.

Se la define como el esfuerzo de cizalla dividido por la velocidad de deformación en cizalla. Los fluidos que se deforman con relativa facilidad tienen una viscosidad baja y son relativamente móviles; los fluidos con una viscosidad alta son relativamente inmóviles.

Shear viscosity Viscosidad de cizalla () = esfuerzo de cizalla/velocidad de deformación en cizalla

Figura 3: Un reómetro rotativo

La viscosidad está influenciada por la estructura molecular, la presión, el tiempo y la temperatura. Un buen control de la temperatura es fundamental para una medida exacta de la viscosidad. La velocidad de deformación en cizalla también influye en la viscosidad. Los fluidos se definen como newtonianos si su viscosidad no cambia con la velocidad de deformación en cizalla (ver figura 2). Sin embargo, con frecuencia son no-newtonianos y muchos shear thin son fluidificados por cizalla – a mayor velocidad de deformación en cizalla aplicada, más baja es la viscosidad. En la práctica, esto se traduce como una resistencia desproporcionadamente elevada a fluir cuando, por ejemplo, el material es batido muy lentamente. De manera inversa, los materiales pueden ser shear thickening espesarse por cizalla pero no es tan común.

Medición de los datos reológicos

Los reómetros rotativos (ver figura 3) son una forma efectiva de medir los términos antes mencionados para caracterizar la reología del material. Con este tipo de reómetro la muestra suele estar ubicada entre un cono y una placa, y está sujeta a una shear force fuerza de corte a través de la rotación del cono. Las geometrías de medición alternativas incluyen placas paralelas, sistemas de cilindros concéntricos (cilindro y copa) o instrumentos de placas vane tools. Los mejores instrumentos de este tipo tienen:

- Geometría de paletas
- Control preciso de la temperatura
- Un orificio angosto con un tamaño bien definido entre las dos superficies para determinar con precisión la velocidad de deformación en cizalla
- Apertura pequeña de aire para permitir la caracterización de los fluidos de baja viscosidad.
- Control de velocidad y medición en un rango muy amplio para maximizar el rango de medición de la velocidad de deformación en cizalla
- Capacidad para aplicar cizallamiento bidireccional bidirectional shear y llevar a cabo experimentos oscilatorios/dinámicos.

Los reómetros rotativos pueden aplicar fuerza a una muestra de diferentes maneras. El esfuerzo puede controlarse, posibilitando un esfuerzo de cizalla progresivo y continuo, o la realización de experimentos de oscilación controlada. De manera alternativa, la tensión puede controlarse, para permitir una velocidad de deformación en cizalla continua o la realización de experimentos de oscilación controlados. La operación en un modo de cizallamiento continuo y regular (con control de velocidad o de esfuerzo) es la manera más adecuada para generar información de ingeniería de proceso y estudiar de qué manera el comportamiento del material varía con el tiempo y las fuerzas aplicadas. Las pruebas oscilatorias permiten el estudio de la naturaleza viscoelástica de un alimento.

Utilizando la información reológica para resolver problemas prácticos

Para maximizar la relevancia de los estudios reológicos, los experimentos deben estar diseñados de modo tal que aseguren la predicción del parámetro de desempeño del caso y simulen comportamiento durante un proceso particular. En los siguientes ejemplos, se detallan estudios de diferentes alimentos, llevados a cabo con un reómetro Bohlin Gemini, para ilustrar la aplicación práctica de la información reológica.

Prediciendo el comportamiento de sedimentación de la cebada naranja (orange barley)

Las partículas suspendidas en concentrado de agua de cebada sabor naranja tienden a sedimentarse bajo los efectos de la gravedad, algo que hace que el producto no resulte tan atractivo para los consumidores. Las partículas más grandes resultantes de una falla en el procesamiento, o de la floculación durante el almacenamiento, tienen una tendencia mayor a la sedimentación ya que, a mayor tamaño (y peso) de la partícula, mayor es el efecto de la gravedad. Para asegurar la calidad del producto, es necesaria la realización de una evaluación de rutina del comportamiento de sedimentación. Durante el almacenamiento, cuando transcurre la sedimentación, el líquido estará sujeto a esfuerzos de cizalla (gravitacionales) muy bajos.

Se midieron las viscosidades de dos muestras de concentrado de agua de cebada sabor naranja utilizando un reómetro de esfuerzo controlado, a esfuerzos diseñados para estimular las fuerzas gravitacionales.

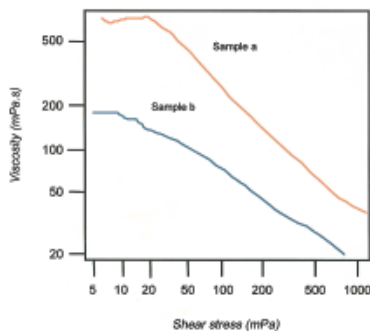


Figura 4 - Viscosidad vs esfuerzo de cizalla para la cebada naranja orange barley

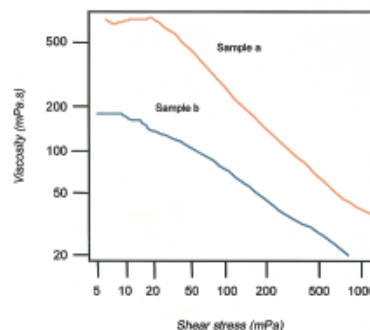


Figura 5 - Viscosidad vs velocidad de deformación por cizalla para la cebada naranja orange barley

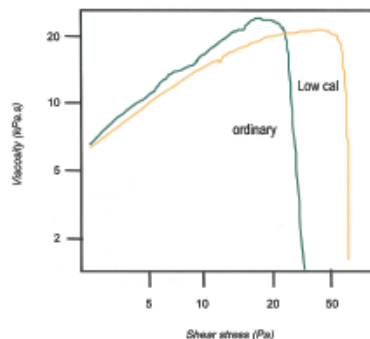


Figura 6 - Esfuerzo de fluencia de la mayonesa

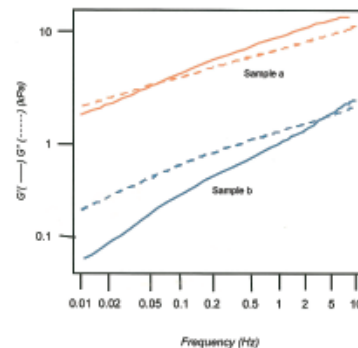


Figura 7 - Caracterización viscoelástica de las margarinas

Para acceder a estos esfuerzos tan bajos se utilizó una geometría de doble cilindro concéntrico. Se calculó la viscosidad siguiendo la aplicación de un esfuerzo de cizalla conocido sobre la muestra y la medición de la velocidad de deformación en cizalla de equilibrio resultante.

El esfuerzo aplicado fue incrementado de manera escalonada (posibilitando el equilibrio de flujo en cada esfuerzo) y se produjo la información que puede observarse en las figuras 4 y 5.

La muestra (a) tiene claramente una viscosidad más elevada en condiciones de esfuerzo de cizalla bajo que la muestra (b). Como ya mencionamos anteriormente, la viscosidad es la resistencia a fluir. Por lo tanto, esta viscosidad más elevada debería traducirse en una tasa de sedimentación más baja. Los resultados indican que la muestra (a) tiene menos posibilidades de sedimentar durante el almacenamiento que la muestra (b). Vale la pena observar que las viscosidades convergen a velocidades de deformación en cizalla más altas, y esto indica que solamente las mediciones a velocidades de deformación y esfuerzos de cizalla bajos resaltarían esta diferencia.

Comparando los esfuerzos de fluencia de diferentes fórmulas de mayonesa

Las mayonesas de bajas calorías por lo general tienen más agua que las fórmulas de mayonesas comunes. Las emulsiones de aceite en agua resultantes del producto de bajas calorías requieren de mayores concentraciones de estabilizadores agregados. El efecto de este cambio en la fórmula sobre el aspecto del producto y la procesabilidad puede investigarse comparando los esfuerzos de fluencia. Algunos materiales aparentemente no fluyen cuando están sujetos a fuerzas muy bajas pero comienzan a moverse cuando se aplica una cierta cantidad de esfuerzo. Por ejemplo, la estructura de un gel, comienza a agrietarse cuando se excede un esfuerzo de cizalla determinado y el material se torna más fluido. El punto en el cual sucede esto se conoce como esfuerzo de fluencia.

El esfuerzo de fluencia es un valor importante porque es un indicador de aspectos específicos del comportamiento del producto. Por ejemplo, una mayonesa con un esfuerzo de fluencia elevado tiene más estructura y el consumidor la percibirá como más espesa y cremosa que un producto de esfuerzo de fluencia bajo que se verá poco espeso y acuoso. Como la estructura se agrieta a cizallamientos más altos – como las velocidades de deformación en cizalla asociadas con la masticación – la muestra se verá espesa en el pote pero la sensación en la boca será fluida, agradable y no muy espesa.

Desde el punto de vista de la ingeniería de proceso, los productos con un esfuerzo de fluencia elevado tendrán un grado relativamente alto de inercia, y esto tiene un impacto sobre el tamaño de la bomba requerida para la puesta en marcha.

Hay varios métodos para medir el esfuerzo de fluencia, pero con un reómetro de esfuerzo controlado, se puede acceder directamente al esfuerzo, posibilitando la medición directa del esfuerzo de fluencia. Las “viscosidades instantáneas” (la relación instantánea/estado no estacionario del esfuerzo de cizalla sobre la velocidad de deformación en cizalla) se calculan a partir de los datos. Al confrontarlos con el esfuerzo aplicado, muestran un repentino descenso en la viscosidad en el punto donde el material fluye. El esfuerzo en este punto es el esfuerzo de fluencia. La Figura 6 muestra la viscosidad instantánea – trazos de esfuerzos de cizalla para las muestras de mayonesa antes mencionadas.

El esfuerzo de fluencia es identificado fácilmente a partir de estos gráficos como el esfuerzo en el cual la viscosidad instantánea llega al máximo. La información muestra que el esfuerzo de fluencia de la versión bajas calorías (con un mayor contenido de agua) es más elevado, y esto indica que es una emulsión más estable o estructurada.

Investigando el comportamiento viscoelástico de las cremas de margarina

Los materiales viscoelásticos presentan un comportamiento diferente a través de los distintos periodos de tiempo. Silly Putty (masa de plastilina que rebota) es un buen ejemplo. Silly Putty rebota al caer, comportándose como un sólido o mostrando un comportamiento elástico en este hecho de escala de tiempo baja/alta frecuencia. Sin embargo, si se lo deja sobre una mesa fluye lentamente, mostrando un comportamiento viscoso o similar al de un líquido, durante este episodio de escala de tiempo alta/baja frecuencia. Para investigar la viscoelasticidad de un material, se llevan a cabo experimentos oscilatorios o dinámicos. En vez de someter a la muestra a un esfuerzo rotativo continuo, se aplica un esfuerzo sinusoidal y se miden

la tensión sinusoidal resultante y el retraso de fase que acompaña. La frecuencia de la señal de entrada varía durante el experimento para dar un espectro de huella digital para el material. El comportamiento dependiente de la frecuencia del producto puede traducirse directamente en información acerca de la forma en la cual se comportará durante distintos periodos de tiempo, ya que las frecuencias bajas se correlacionan con tiempos prolongados y viceversa.

El esfuerzo de fluencia es un valor importante porque es indicativo de aspectos específicos del comportamiento del producto

La Figura 7 muestra valores para dos funciones de viscoelasticidad, una relacionada con la naturaleza elástica del material (línea continua) y la otra con el comportamiento viscoso (línea punteada), medidos para dos cremas de margarina diferentes. A frecuencias bajas, las funciones son relevantes para la forma en la cual el material se comportará a lo largo de periodos largos cuando está almacenado. Un problema potencial con las cremas de margarina (emulsiones de agua en aceite) es que puede separarse después de un tiempo: un fenómeno conocido como sinéresis. La probabilidad de que una crema exhiba sinéresis puede predecirse a partir de los datos de viscoelasticidad comparando el valor de los módulos de almacenamiento G' (que describe un comportamiento elástico) y el módulo de pérdida G'' (que describe el comportamiento viscoso). Para evitar la sinéresis, el módulo de almacenamiento debe ser similar o más grande que el módulo de pérdida. Si el módulo de almacenamiento es mucho más pequeño que el módulo viscoso, el material se va a comportar más como un líquido, y habrá menos estructura en la muestra para prevenir la sinéresis. A frecuencias bajas (relacionadas con escalas de tiempo extensas) este es el caso de la muestra (a) pero no de la muestra (b). Por lo tanto lo esperable es que la muestra (a) sea más estable: un resultado confirmado en otras pruebas.

La información a frecuencias más altas es más relevante para el comportamiento de la crema en escalas de tiempo cortas, como en el proceso de propagación. Para una buena capacidad de propagación, una muestra debería tener un módulo de almacenamiento grande en comparación con el módulo de pérdida. Esto indicaría una estructura considerable – algo sobre lo cual propagarse. Con una muestra viscosamente dominada (módulo de pérdida elevada), el material simplemente se desplomaría en vez de propagarse. La muestra (a) muestra un componente de módulo de almacenamiento más elevado que la muestra (b) a las frecuencias más elevadas relevantes y puede por lo tanto predecirse que tendrán propiedades de propagación superiores.

Conclusiones

Es evidente a partir de los estudios antes descriptos que los datos reológicos pueden facilitar la comprensión del desempeño del producto, como así también proporcionar datos para el diseño de proceso. Por lo tanto, la reología es una herramienta útil para los procesadores de alimentos que busquen acelerar y optimizar el proceso de desarrollo del producto y una opción relativamente simple para una gama de aplicaciones de Control de Calidad.

Steve Carrington
Gerente de Producto de Sistemas de Reología
Malvern Instruments Ltd
www.malvern.co.uk