

# Propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos, ensayos bajo cizalla oscilatoria, ejemplos en subproductos de aguacate

**Laura Patricia Martínez-Padilla**

Laboratorio de Propiedades Reológicas y Funcionales en Alimentos  
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Av. 1 de mayo, S.N., 54740 Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México  
[lpmp@unam.mx](mailto:lpmp@unam.mx)

## Resumen

Las propiedades viscoelásticas de alimentos son importantes para evaluar cambios de formulación o del proceso aplicado, además de ser útiles en la evaluación de la calidad de productos. En ocasiones se recurre a la medida de viscosidad, que no es suficiente para explicar el comportamiento reológico de materiales semisólidos. En este documento se presentan algunos espectros mecánicos de subproductos de aguacate, estableciendo previamente los conceptos requeridos para su comprensión.

## Palabras clave

Viscoelasticidad, alimentos semisólidos, aguacate, cizalla oscilatoria, reología

Un material puede comportarse mecánicamente como un sólido o como un líquido, independientemente de su aspecto físico o su estado de organización molecular (lo cual de-

pende de la escala de tiempo en la que ocurre la deformación). Algunos materiales presentan ambos comportamientos y son denominados materiales viscoelásticos. Muchos alimentos fluidos requieren de un esfuerzo mínimo para fluir, denominado esfuerzo de cedencia que, después de sobrepasarlo, presentan un comportamiento no-newtoniano en condiciones de flujo. El comportamiento observado en condiciones de flujo es un indicio de que el material presenta propiedades viscoelásticas.

Se pueden encontrar en la literatura científica el comportamiento reológico o las propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos derivadas de las curvas determinadas en reómetros, a través de tres ensayos: a) Fluencia-recuperación, se aplica un esfuerzo de cizalla constante durante un tiempo y se mide la deformación de cizalla producida, se elimina el esfuerzo de cizalla y se da seguimiento a la recupera-

ción del material; b) Relajación, se aplica una deformación de cizalla constante en función del tiempo y se mide el esfuerzo de cizalla resultante, o c) Cizalla oscilatoria, se aplica una deformación en forma sinusoidal y se mide el esfuerzo de cizalla correspondiente, también como función sinusoidal, y este último ensayo es el más empleado, dada la facilidad de interpretar los gráficos.

### Ensayos bajo cizalla oscilatoria

Para comprender los gráficos reportados en el ensayo bajo cizalla oscilatoria, es necesario definir las ecuaciones con las variables involucradas [1]. La deformación de cizalla ( $\gamma$ ) aplicada está definida por una función sinusoidal del tiempo ( $t$ ), Ec. 1:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

donde,  $\gamma_0$  es la amplitud de  $\gamma$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular (rad/s). El esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) resultante está definido también por una función sinusoidal, cuya curva puede estar desfasada con respecto a la de  $\gamma$ , por  $\delta$ , Ec. 2:

$$\sigma = \sigma_0 \text{sen}(\omega t - \delta) \quad (2)$$

donde,  $\sigma_0$  es la amplitud del  $\sigma$ , que no deberá confundirse con el esfuerzo de cedencia que tiene la misma nomenclatura en el tratamiento de fluidos viscosos en condiciones de flujo bajo cizalla [2].

En el ensayo bajo cizalla oscilatoria de pequeña amplitud, donde se aplica  $\gamma$  a  $\omega$  constante, en un material fluido, la curva de respuesta,  $\sigma$ , se desfasará  $90^\circ$  ( $\delta = \pi/2$ ), mientras que, en un material sólido, las curvas de  $\sigma$  estarán en fase ( $0^\circ$ ). Como se observa en la Figura 1, la respuesta del  $\sigma$  de un material fluido (línea punteada roja) estará desfasado  $\pi/2$  o  $90^\circ$ , donde el valle de la curva de  $\gamma$  (línea continua)

coincide con la cresta de  $\sigma$  (línea punteada roja). En el caso de un material sólido, el  $\sigma$  obtenido como variable de respuesta (línea azul punteada) estará en fase con la  $\gamma$  aplicada (línea continua), donde las crestas de las curvas coinciden. Un material viscoelástico presentará un desfase entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

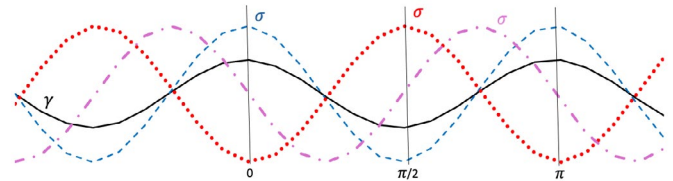


Figura 1. Ejemplo de la deformación de cizalla aplicada,  $\gamma$ , (—) y la respuesta del esfuerzo de cizalla,  $\sigma$ , en un material sólido (---), un fluido (.....) y un material viscoelástico (— · —)

Por facilidad, se han definido dos módulos que relacionan las amplitudes,  $\gamma_0$ ,  $\sigma_0$ , de las curvas sinusoidales con el desplazamiento,  $\delta$ , módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ ), Ec. 3 y Ec. 4, respectivamente.

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (3)$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \text{sen} \delta \quad (4)$$

Además, el módulo complejo  $G^* = \sqrt{[(G')^2 + (G'')^2]}$  involucra ambos módulos.  $G'$  es una medida de la energía almacenada y recuperada por el material en un ciclo, es un indicador del componente elástico del material, mientras que  $G''$  es una medida de la energía disipada como calor por el material en un ciclo y es un indicador del componente viscoso del material. Los módulos se obtienen al considerar que, en un material viscoelástico, el  $\sigma$  está relacionado con la  $\gamma$  del sólido (sólido de Hooke) y el flujo del material (fluido de Newton) a través de la Ec. 5.

$$\sigma = G' \gamma + \eta' \dot{\gamma} = G' \gamma + (G''/\omega) \dot{\gamma} \quad (5)$$

$\eta'$  es la viscosidad dinámica,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación de cizalla, o derivada de  $\gamma$  en función del tiempo, Ec. 6.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d[\gamma_0 \text{sen}(\omega t)]}{dt} = \gamma_0 \cos(\omega t) \quad (6)$$

Si en un material predomina el comportamiento fluido, los módulos suelen expresarse en términos de la viscosidad dinámica,  $\eta'$ , Ec. 7, y de la componente de la viscosidad compleja fuera de fase,  $\eta''$ , Ec. 8, definidas por  $G''$  y  $G'$ , respectivamente. Aunque, lo más común es encontrar resultados en función de la viscosidad compleja,  $|\eta^*|$ , Ec. 9.

$$\eta' = G''/\omega \quad (7)$$

$$\eta'' = G'/\omega \quad (8)$$

$$|\eta^*| = G^*/\omega = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2} \quad (9)$$

Se cuenta también con otro parámetro que describe el comportamiento viscoelástico de los materiales, la tangente del ángulo de desfaseamiento o  $\tan \delta$ , que puede variar desde 0 hasta  $\infty$ , Ec. 10. Si el valor es inferior a la unidad, indica que el material se comporta predominantemente como sólido, y si el valor es mayor a la unidad el comportamiento predominante es el de un fluido.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (10)$$

Es importante mencionar que en las pruebas oscilatorias de pequeña amplitud se emplean deformaciones donde los materiales no modifican significativamente su macroestructura. Por lo general, deformaciones de cizalla menores al 5 % (con el fin de mantener una respuesta proporcional o lineal, entre la  $\gamma$  aplicada y el  $\sigma$  medido). Cuando las pruebas se realizan bajo estas condiciones se indica que están en condiciones de viscoelasticidad lineal. Bajo estas, la  $\gamma$  es función solamente del tiempo y no de

la magnitud de  $\gamma$ . Las pruebas oscilatorias de pequeña amplitud también pueden realizarse en reómetros, donde se puede aplicar el  $\sigma$  de manera sinusoidal y se mide la  $\gamma$  resultante. De igual manera, se aplican  $\sigma$  pequeños que no sobrepasen el 5 % de  $\gamma$  y las curvas de respuesta serán similares a las presentadas en la Figura 1.

El ensayo bajo cizalla oscilatoria se realiza en dos etapas, la primera donde se localiza la zona de viscoelasticidad lineal y la segunda donde se obtiene el espectro mecánico. En la primera etapa se realiza un barrido de  $\gamma$  manteniendo la  $\omega$  constante, y se traza el gráfico con los módulos en función de  $\gamma$ , por lo general, expresada en porcentaje. En algunos casos, esta figura se omite en los artículos.

En la zona de viscoelasticidad lineal (ZVE), ambos módulos no dependen de  $\gamma$  hasta cierta deformación, por lo que se considera límite de la ZVE. Después de ese límite, por lo general, los módulos disminuirán como consecuencia de la ruptura de enlaces de hidrógeno en la macroestructura. En la segunda etapa se realiza un barrido de frecuencia a  $\gamma$  constante, y se trazan los gráficos de  $G'$  y  $G''$  en función de la frecuencia. A este gráfico se le conoce como espectro mecánico y es donde se puede inferir si el comportamiento es predominantemente sólido, como en los geles; predominantemente fluido, como en las disoluciones diluidas de polímeros, o intermedio como en las concentradas de polisacáridos no gelificantes.

### Propiedades reológicas de subproductos de aguacate

En la Figura 2 se presenta el espectro mecánico característico de un puré de aguacate, obtenido con un dispositivo de cilindros concéntricos (CC27) de acero inoxidable en un reómetro MCR301 (Anton Paar, Austria), manteniendo

una y constante de 0.05 % (ZVL). El puré de aguacate se obtiene después de un molido suave de la pulpa del fruto de aguacate. Se puede observar el comportamiento sólido predominante, ya que  $G'$  es superior a  $G''$ , en todo el intervalo de frecuencia estudiado, además de que no se observa dependencia de  $G'$  con  $\omega$ .

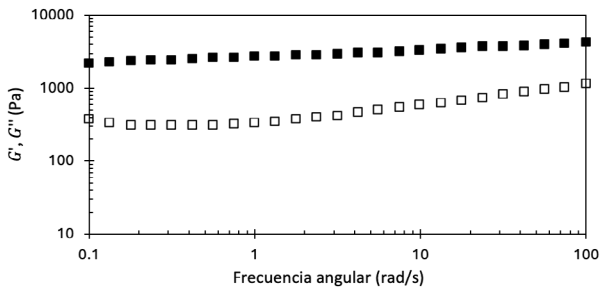


Figura 2. Espectro mecánico de puré de aguacate, 73.5 % humedad, 25 °C,  $G'$  símbolos llenos,  $G''$ , símbolos vacíos

Los módulos evaluados pueden usarse para cuantificar el efecto de algún cambio en el material, como la adición de agua y el malaxado [3]. En la Figura 3 se presentan los módulos evaluados a una frecuencia angular constante (1 rad/s), en función de la humedad del puré malaxado.

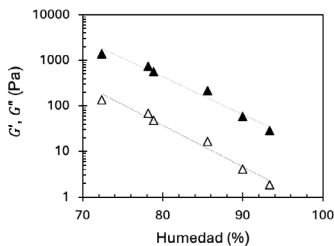


Figura 3.  $G'$  y  $G''$  de puré de aguacate, evaluados a 1 rad/s, sin mezclar y mezclada con agua purificada en una malaxadora (1 hora) en función de la humedad, 25 °C,  $G'$  símbolos llenos,  $G''$ , símbolos vacíos

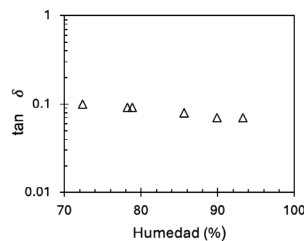


Figura 4.  $\tan \delta$  de pulpa de aguacate, evaluada a 1 rad/s, sin mezclar y mezclada con agua purificada en una malaxadora (1 hora) en función de la humedad, 25 °C

Como es de esperarse, el valor de los módulos disminuye conforme aumenta el contenido de humedad de las muestras. Sin embargo, el valor de la  $\tan \delta$  es cercana a 0.1, a pesar de

los altos contenidos de humedad alcanzados (Figura 4), implicando que el predominio del comportamiento sólido no cambia, a pesar del gran contenido de humedad.

En la Figura 5, se presenta el espectro mecánico de un producto tipo emulsión aceite en agua, que contiene pulpa de aguacate, incluye tres réplicas del ensayo, confirmando que el ensayo es repetible. La caracterización reológica se realizó en un dispositivo de placas paralelas con una separación de 1 mm, la placa que oscila está dentada y es de acero inoxidable. Se utilizó un reómetro MCR301 (Anton Paar, Austria), manteniendo una y constante de 0.05 % (ZVL). Se observan espectros parecidos a los del puré de aguacate, donde el predominio del comportamiento sólido se mantiene. En este caso, los valores de los módulos son menores a los que presentó el puré de aguacate y se observa una ligera dependencia de los módulos con la frecuencia.

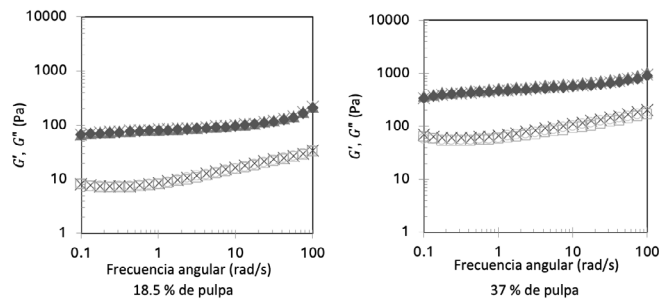


Figura 5. Espectros mecánicos de una emulsión conteniendo pulpa de aguacate 25 °C,  $G'$  símbolos llenos,  $G''$ , símbolos vacíos

Finalmente, en la Figura 6 se presenta la viscosidad compleja de las emulsiones aceite en agua con pulpa de aguacate en dos proporciones, con la finalidad de comparar el comportamiento viscoelástico en términos de viscosidad. Se confirma la similitud de la dependencia de  $|\eta^*|$  con  $\omega$ , al compararla con las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla, que se obtienen en

condiciones de flujo para fluidos no-newtonianos, y que la emulsión con mayor proporción de pulpa presenta la mayor  $|\eta^*|$ .

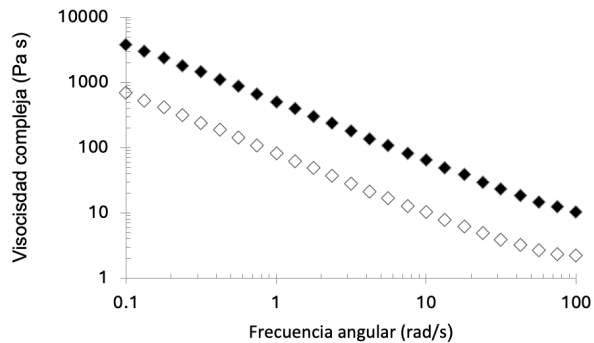


Figura 6. Viscosidad compleja, en función de una emulsión conteniendo pulpa de aguacate 25 °C, 37 % pulpa, símbolos llenos, 17.5 % pulpa, símbolos vacíos

## Conclusión

El ensayo bajo cizalla oscilatoria es un método que permite caracterizar las propiedades viscoelásticas de alimentos semisólidos con gráficos de fácil interpretación. La pulpa de aguacate es un material sólido que, molida en forma de puré, malaxada en agua o incorporada en un sistema disperso tipo emulsión, presenta propiedades viscoelásticas, predominando el comportamiento sólido al fluido en todos los casos mencionados.

## Referencias

- [1] Steffe, J.F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2nd ed. East Lansing, MI: Freeman Press.
- [2] Martínez-Padilla, L.P. (2022). Tratamiento de datos de alimentos fluidos para la determinación experimental de viscosidad. *Processing of fluid food data for the experimental determination of viscosity*. *Educación Química*, 33(3), 3.81406.
- [3] Martínez-Padilla, L.P., Franke, L., Juliano, P. (2017). Characterisation of the viscoelastic properties of avocado puree for process design applications. *Biosystems Engineering*, 161:62-69.