

Cómo caracterizar el comportamiento viscoelástico de un alimento

Apellidos, nombre	Talens Oliag, Pau (pautalens@tal.upv.es)
Departamento	Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

La viscoelasticidad es un tipo de comportamiento reológico anelástico que presentan ciertos materiales que exhiben tanto propiedades viscosas como propiedades elásticas cuando se deforman ^[1]. El conocimiento de las propiedades viscoelásticas de los alimentos es muy útil en el diseño y predicción de la estabilidad de muestras almacenadas ^[2]. En este artículo vamos a presentar de qué distintas formas es posible caracterizar el comportamiento viscoelástico de un alimento identificando el rango de viscoelasticidad lineal, rango en el cuál la respuesta del material está fuertemente relacionada con su estructura molecular.

2 Introducción

Las propiedades viscoelásticas de un alimento están íntimamente relacionadas con la estructura en reposo del sistema y su análisis proporciona una interesante información acerca de la misma o de sus cambios asociados al procesado del producto o a cambios en la funcionalidad de sus componentes. Su estudio implica establecer relaciones entre el esfuerzo aplicado, la deformación producida, y el tiempo.

La relación esfuerzo-deformación puede ser dependiente sólo del tiempo, lo que se conoce como viscoelasticidad lineal, o dependiente tanto del tiempo como de la magnitud de la fuerza aplicada, viscoelasticidad no lineal. En este sentido podemos decir que el comportamiento mecánico de un material viscoelástico puede ser de dos tipos: lineal y no lineal.

Por definición se dirá que un material tiene comportamiento lineal si la deformación es una función lineal de la fuerza aplicada. En este punto el material aún se puede recuperar de la deformación que ha sufrido. El comportamiento lineal está evidentemente unido a la capacidad de un material de soportar deformaciones, sin modificación de su estructura microscópica. En este sentido, se puede considerar que el estudio de las propiedades viscoelásticas lineales permiten caracterizar la estructura "en reposo" del material. Trabajar en el dominio viscoelástico lineal, supone, por tanto, realizar ensayos no destructivos.

Todos los materiales pueden presentar un comportamiento lineal, con la condición de que las fuerzas y las deformaciones, a que son sometidos, sean suficientemente pequeñas. Por ejemplo, el límite de comportamiento viscoelástico lineal para frutas frescas es aproximadamente una deformación del 1.5-3%, mientras que para salchichas tipo Frankfurt ese límite estaría alrededor de un 3-8%.

En el campo alimentario, el estudio del comportamiento mecánico de un alimento con comportamiento viscoelástico se realiza en el rango lineal, con diferencia el mejor descrito, tanto teórica como experimentalmente.

3 Objetivo

Con la redacción de este artículo docente se persigue que los alumnos adquieran destreza a la hora de evaluar de qué forma pueden caracterizar el comportamiento viscoelástico de un alimento e identificar qué tipo de ensayo puede ser el más adecuado para su caracterización.

4 Desarrollo

En el punto 4.1 vamos a describir cómo caracterizar el comportamiento viscoelástico de un alimento

En el punto 4.2 veremos los distintos tipos de ensayos que podemos emplear para caracterizar el comportamiento viscoelástico de un alimento.

En el punto 4.3 veremos cómo identificar el rango de viscoelasticidad lineal, mostrando un ejemplo de determinación.

4.1 Cómo caracterizar el comportamiento viscoelástico

El comportamiento mecánico de un alimento viscoelástico lineal se puede modelizar mediante analogías mecánicas compuestas por muelles, denominados en inglés springs y amortiguadores, denominados en inglés dashpots [3]. El muelle obedece la ley de Hooke (ecuación 1) y el amortiguador la ley de Newton (ecuación 2).

$$\sigma = G\gamma \quad (1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo normal (Pa)

G = Modulo de Elasticidad (Pa)

γ = Deformación unitaria (mm/mm)

$$\sigma = \eta\dot{\gamma} \quad (2)$$

Donde:

σ = Esfuerzo normal (Pa).

η = Coeficiente de viscosidad (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ = gradiente de velocidad (s^{-1})

El muelle representa el comportamiento mecánico de un sólido ideal elástico. Cuando un muelle se fija de un lado y se aplica una carga en el otro lado, el muelle instantáneamente se extiende. Cuando dejamos de aplicar la carga el muelle recupera su longitud original (Figura 1a). El amortiguador representa el comportamiento de un líquido newtoniano. Cuando se aplica una carga éste se abre gradualmente con el tiempo. Cuando se deja de aplicar la carga el amortiguador permanece abierto, no recuperando su forma original (Figura 1b).

Dependiendo de cómo estén conectados el muelle ideal y el amortiguador ideal, existirán varias configuraciones o arreglos combinados llamados modelos viscoelásticos ideales. Las configuraciones más simples, son las propuestas por Kelvin y Maxwell.

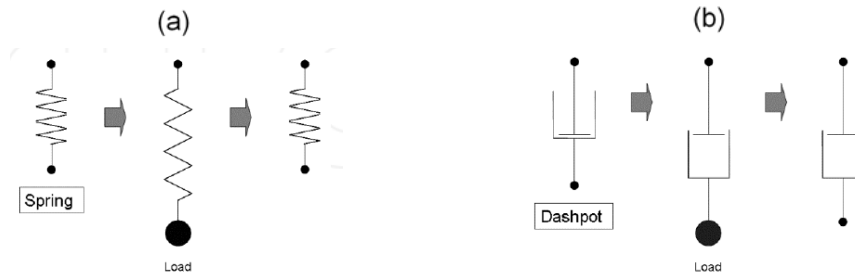


Figura 1. Muelle con comportamiento sólido ideal elástico (a) y amortiguador con comportamiento líquido newtoniano (b).

En el modelo de Kelvin-Voigt, el muelle y el amortiguador están conectados en paralelo, y, por tanto, el esfuerzo impuesto al elemento será la suma de los esfuerzos impuestos, mientras que la deformación será la misma en cada componente. Este modelo representa el comportamiento de un material viscoelástico sólido. Si se colocan en serie, hablamos del modelo de Kelvin-Voigt generalizado (Figura 2).

En el modelo de Maxwell, el muelle y el amortiguador están conectados en serie, de forma que el esfuerzo impuesto es soportado por cada elemento y la deformación es la suma de las deformaciones producidas en cada elemento individual. Este modelo representa el comportamiento de un material viscoelástico líquido. Si se colocan en paralelo, hablamos del modelo de Maxwell generalizado (Figura 3).

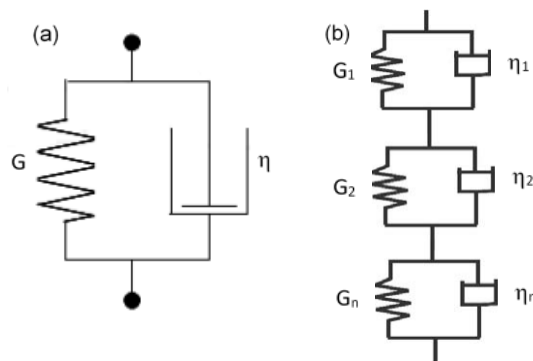


Figura 2. Modelo de Kelvin-Voigt (a) y modelo de Kelvin-Voigt generalizado (b)

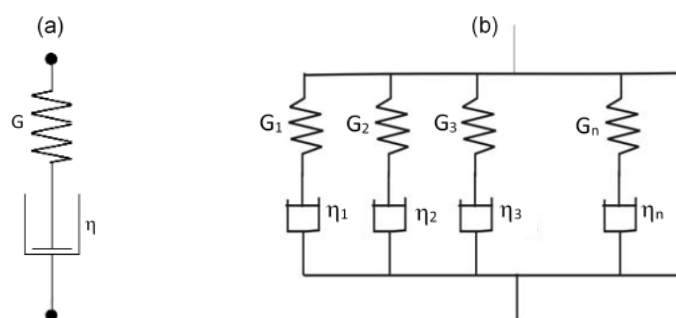


Figura 3. Modelo de Maxwell (a) y modelo de Maxwell generalizado (b)

Si los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt se combinan en serie, se obtiene el modelo de Burger (figura 4). Se trata de uno de los modelos más usados, debido a su relativa simplicidad y por sus aceptables resultados dentro del campo alimentario.

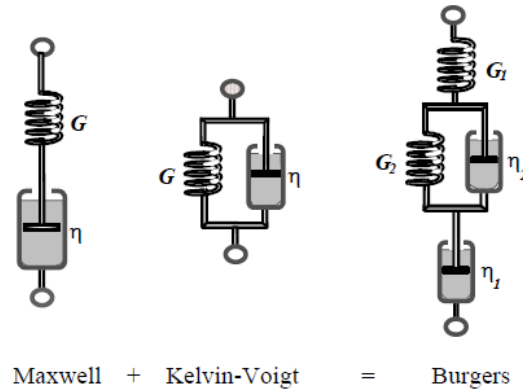


Figura 4. Modelo de Burger

4.2 Tipos de ensayos viscoelásticos

El comportamiento viscoelástico lineal de un alimento puede caracterizarse a través de distintos tipos de ensayos. Tres de los ensayos más utilizados en el campo alimentario son los ensayos de fluencia o creep-recovery, los ensayos de relajación de esfuerzo y los ensayos oscilatorios.

Los dos primeros ensayos, son ensayos dependientes del tiempo y por tanto podemos clasificarlos en la categoría de pruebas transitorias. Las pruebas consisten en someter la muestra a una deformación, o un esfuerzo, controlados y constantes, caracterizando la evolución de la magnitud no impuesta con el tiempo.

El ensayo de fluencia, en inglés llamado ensayo de creep-recovery, consiste en aplicar un esfuerzo cortante constante a un material inicialmente en reposo y medir como varia la deformación con el tiempo (creep). El ensayo sigue con un periodo de recuperación, en el cual se cancela el esfuerzo aplicado, y se registra como varia la deformación con el tiempo (recovery). Para ello debe utilizarse un reómetro de esfuerzo controlado. El esfuerzo debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar que la respuesta sea lineal, siempre y cuando la respuesta se encuentre dentro del rango de deformaciones que se pueda medir.

La función viscoelástica obtenida en este ensayo es la capacitancia $J(t)$, definida en inglés como compliance. En general, cuanto más altos sean los valores de $J(t)$, la estructura interna del producto será más frágil y por tanto más viscoso será el producto, y, por el contrario, cuanto más bajos sean los valores de $J(t)$, la estructura interna del producto será más reforzada y por tanto más elástico será el producto.

El ensayo de relajación de esfuerzo consiste en aplicar una deformación de forma rápida (que pueda considerarse instantánea), y medir la variación del esfuerzo cortante con el tiempo.

Los ensayos oscilatorios, son ensayos independientes del tiempo y podemos clasificarlos en la categoría de ensayos dinámicos. Son pruebas en las que se hace variar una de las dos magnitudes (esfuerzo o deformación) de forma sinusoidal con el tiempo.

En todos los casos debemos asegurarnos que las determinaciones se realizan en el rango de viscoelasticidad lineal.

4.3 Rango de viscoelasticidad lineal. Ejemplo de determinación

La región viscoelástica lineal (LVR, Linear Viscoelastic Region) está definida por el rango de esfuerzos en el cual el módulo complejo (G^*), que representa la resistencia total de una sustancia frente a una deformación aplicada, permanece constante y no depende de otros parámetros reológicos, como puedan ser el esfuerzo o la deformación [4]. En esta región, el esfuerzo y la deformación son infinitesimales y la relación entre ambas magnitudes es solo función del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo aplicado. En esta condición de viscoelasticidad lineal es sencillo describir relaciones entre el esfuerzo, la deformación y el tiempo mediante ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes constantes. Dado que, en esta región, el material está sujeto a deformaciones casi infinitesimales, muy cercanas al equilibrio, la respuesta del material está fuertemente condicionada con su estructura molecular, lo que le confiere la capacidad de ser una buena herramienta de caracterización. Más allá de la LVR, la muestra es deformada hasta el punto en el que los enlaces temporales entre moléculas o agregados son destruidos, entrando en la zona de flujo. Por esta razón, la medida del comportamiento viscoelástico de un material suele realizarse en dos etapas, en la primera etapa se determina la región viscoelástica lineal y en la segunda etapa se realiza algunos de los 3 ensayos antes mencionados. Para la determinación del límite entre región lineal y no lineal del rango viscoelástico es necesario llevar a cabo ensayos dinámicos a un valor determinado de frecuencia haciendo un barrido de esfuerzo (stress sweep) o de amplitud-deformación (amplitud – strain sweep).

Imaginad que tenemos una crema de chocolate a la cuál le queremos determinar su comportamiento viscoelástico. Lo primero que tendremos que hacer es determinar su LRV. Para ello podemos hacer un barrido de esfuerzo, el cual consiste en someter a la crema de chocolate a un barrido de 0.1 a 100 Pa trabajando a 1Hz. La representación de G^* frente al esfuerzo, o la representación del módulo elástico (G'), que representa la componente elástica del producto, o el módulo viscoso (G''), que representa el comportamiento viscoso de la muestra, frente al esfuerzo, nos permitirá determinar hasta donde abarca la LVR. De ambos módulos, G' es más sensible para el cálculo de LVR. Si observamos la figura 5, la LVR se moverá desde 0.1 Pa hasta aproximadamente 8Pa, lo que nos dice que siempre que trabajemos a un esfuerzo dentro de ese intervalo de 0.1 a 8Pa, estaremos trabajando en la LVR.

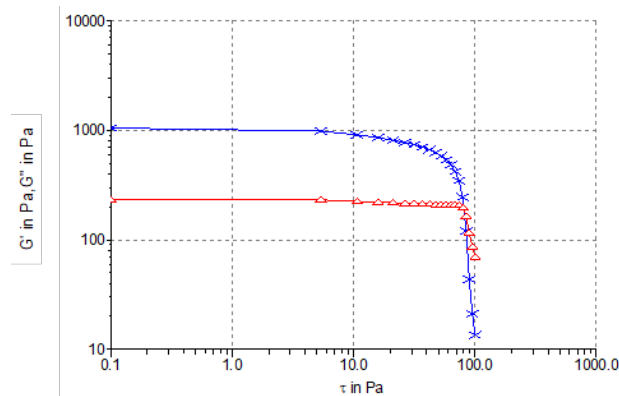


Figura 5. Modelo de Burger

5 Cierre

En este artículo docente se han expuesto los fundamentos para la caracterización del comportamiento viscoelástico de un alimento, se han descrito los principales tipos de ensayos que pueden realizarse para el análisis de las propiedades viscoelásticas en alimentos y se ha indicado como podemos identificar la región viscoelástica lineal, región en la cuál es recomendable trabajar para la caracterización de este tipo de productos.

6 Bibliografía

- [1] <https://es.wikipedia.org/wiki/Viscoelasticidad>
- [2] Ramos, Afonso & Ibarz, Albert. (2006). Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. Ciencia E Tecnologia De Alimentos - CIENCIA TECNOL ALIMENT. 26. DOI: 10.1590/S0101-20612006000100034
- [3] Steffe, J. (1996). Rheological methods in Food process engineering 2nd Ed. Freeman Press. East Lansing. (USA). p.325-331.
- [4] Moreno Botella, Rodrigo (2005). Reología de suspensions cerámicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.