

Caracterización del comportamiento mecánico de alimentos sólidos

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

1 Resumen de las ideas clave

Las propiedades mecánicas son aquellas propiedades que nos permiten describir el comportamiento de un material ante los efectos de fuerzas que actúan sobre él. En el campo alimentario, las propiedades mecánicas de alimentos sólidos se estudian principalmente evaluando sus propiedades texturales. Estas propiedades se manifiestan durante su procesado y consumo. Dado que no se trata de una sola propiedad, sino de un conjunto de sensaciones percibidas hay que seleccionar cuidadosamente la forma de evaluar la textura de un alimento.

En este artículo vamos a presentar como podemos determinar instrumentalmente las propiedades texturales en un alimento sólido, entendiendo por sólido, aquel alimento que cuando es sometido a un esfuerzo se deforma o incluso se rompe.

2 Introducción

La textura de los alimentos es un concepto ampliamente difundido, pero de difícil definición. Bourne ^[1] define las propiedades texturales de un alimento como aquel grupo de características físicas que son consecuencia de los elementos estructurales del mismo, son sensibles al tacto, están relacionadas con la deformación, desintegración y flujo del alimento bajo la acción de una fuerza y pueden ser medidas objetivamente en función de la masa, tiempo y distancia deformada. La Norma Española de Análisis Sensorial sobre Vocabulario ^[2] la define como “el conjunto de propiedades mecánicas, geométricas y de superficie de un producto, perceptibles por los mecano-receptores, los receptores táctiles y en ciertos casos los visuales y los auditivos”.

Los métodos actuales para la evaluación de las propiedades texturales se clasifican en subjetivos y objetivos. En los métodos subjetivos se consideran las impresiones sensoriales de un panel de catadores que juzga la calidad, utilizando análisis de correlación u otras técnicas estadísticas. En los métodos objetivos estas cualidades, se evalúan mediante medidas efectuadas con instrumentos físicos. En ambos casos hay que evaluar aquellas características que sean significativas para la aceptación del producto terminado por parte del consumidor.

Es importante tener en cuenta que antes de que cualquier técnica instrumental sea adoptada como método de rutina para el análisis de la calidad de un producto, se debe confirmar que los resultados obtenidos por los métodos objetivos se correlacionan con los resultados de un análisis sensorial.

Entre los métodos instrumentales para evaluar las propiedades mecánicas de un alimento sólido, las prensas universales de medida de textura con células de carga y dispositivos que pueden adaptarse para realizar cualquiera tipo de ensayo, son los más usados.

3 Objetivo

Con la redacción de este artículo docente se persigue que los alumnos adquieran destreza en la caracterización de las propiedades mecánicas de un alimento sólido.

4 Desarrollo

En el punto 4.1 vamos a describir como caracterizar el comportamiento mecánico de un alimento sólido

En el punto 4.2 veremos ejemplos de distintos tipos de ensayos que podemos realizar para caracterizar el comportamiento mecánico de un sólido.

En el punto 4.3 veremos un ejemplo real de caracterización.

4.1 Caracterización del comportamiento mecánico de un alimento sólido

Imaginar que tenemos un cilindro sólido y aplicamos una carga o fuerza sobre él con una prensa universal (figura 1). Podemos registrar el esfuerzo generado en el seno del sólido y la deformación producida en el producto.

El esfuerzo, o fuerza ejercida sobre el área transversal sobre la que la fuerza está actuando, será de la misma magnitud y de sentido contrario a la carga aplicada. El esfuerzo normalmente se divide por A_0 (área inicial) pero para deformaciones grandes es recomendable usar el área instantánea. Este esfuerzo, se mide generalmente en Pascales, que es el esfuerzo que genera una carga de un Newton de fuerza aplicada sobre una superficie de un metro cuadrado.

La deformación producida en el producto se puede medir en unidades de longitud, área o volumen. Para dar cifras generales la deformación se expresa de forma relativa. Para ello se divide el cambio en la dimensión entre la dimensión original y se multiplica por 100.



Figura 1. Ejemplo de una prensa universal

El esfuerzo y la deformación que experimenta un sólido ante una carga están relacionados entre sí y definen, por tanto, el comportamiento mecánico del material. Debemos conocer ambos parámetros para caracterizar un sólido. La mejor forma de poder caracterizar el comportamiento de un alimento sólido es a través de la curva que relaciona esfuerzo-deformación.

La figura 2 muestra, a título de ejemplo, una curva esfuerzo-deformación de un material deformable. El punto a se define como el límite de proporcionalidad. Hasta este punto se cumple la ley de Hook que indica que el esfuerzo es proporcional a la deformación. El punto b se denomina límite elástico. Esfuerzos por debajo de este punto inducen a deformaciones elásticas, por encima de este punto implican

deformaciones plásticas. La deformación elástica es la que desaparece por completo cuando el material se descarga, mientras que la deformación plástica es la que no se recupera al cesar la carga aplicada. Identificar este punto es bastante difícil y dado que en la práctica está muy próximo al punto a, muchas veces se identifica este punto como el límite elástico del material. Una vez superamos este punto se produce una mayor deformación en el material hasta que el material se rompe en el punto C.

La curva de la figura 2 permite evaluar distintas propiedades mecánicas:

- La pendiente de la parte lineal nos determina el módulo elástico o módulo de Young, que nos define la rigidez y/o flexibilidad del material. Cuanto menor sea la pendiente más flexible será el material.
- El punto b nos indica la elasticidad y/o plasticidad del material. Cuanto más alto sea el valor de esfuerzo más elasticidad tendrá el material.
- La distancia entre el punto b y el punto c nos indica la fragilidad, ductilidad y/o maelabilidad del material.
- El punto c nos indica la resistencia del material.
- Muchas veces es interesante evaluar el área total debajo de la curva. No está relacionado directamente con una propiedad mecánica, pero da una información global del comportamiento mecánico de la muestra analizada.

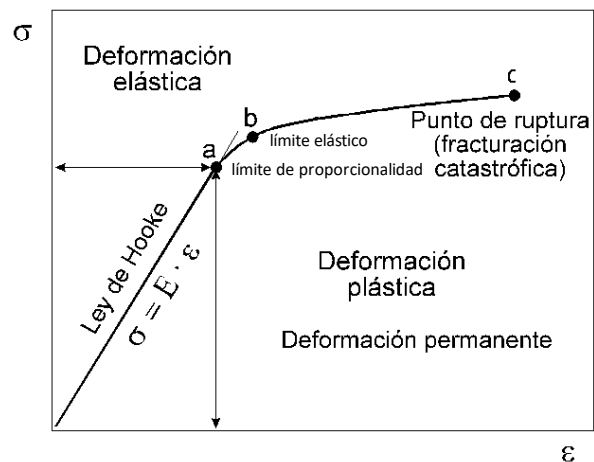


Figura 2. Ejemplo de una curva esfuerzo-deformación de un material deformable
Ejemplos de ensayos

Se debe tener en cuenta que la figura 2 es un ejemplo, y que la forma de la curva variará en función de cómo sean las propiedades mecánicas de nuestro alimento, y el tipo de ensayo que estemos realizando.

4.2 Ejemplos de ensayos mecánicos

Dependiendo del tipo de producto que tengamos, y lo que queramos evaluar, podemos hablar de distintos ensayos mecánicos. A continuación, se detallan algunos de los ensayos más utilizados en el área alimentaria.

- Ensayo de punción: mide la fuerza requerida para hacer penetrar un punzón en un alimento hasta alcanzar el umbral de fluencia o el punto de ruptura del mismo. Estos ensayos pueden realizarse aplicando una fuerza constante o una velocidad de

deformación constante y en ellos, normalmente, la profundidad de penetración es constante.

Uno de los mayores inconvenientes que presenta el ensayo de punción es el alto grado de variabilidad de las medidas, debido tanto a la variabilidad en los instrumentos de medida como a la misma heterogeneidad del producto, que es deformado en áreas pequeñas que pueden ser poco representativas del total.

Además de las prensas universales para ensayos de textura, que permiten obtener la curva fuerza-distancia completa, entre los instrumentos utilizados para realizar este tipo de ensayos, se encuentran algunos manuales, como los punzones Magness-Taylor, penetrómetros, durómetros o gelómetro Bloom.

b) Ensayo de extrusión: consiste en aplicar una fuerza al alimento hasta que éste fluye por alguna salida del sensor. La fluencia puede ser hacia arriba o bien por alguna ranura que haya en la parte inferior de la célula. Este ensayo se utiliza con alimentos que fluyen con relativa facilidad, como alimentos viscosos, geles o grasas.

Los equipos utilizados generalmente para estos ensayos son la célula Ottawa, célula de extrusión directa, célula de extrusión inversa o la célula kramer (aunque esta célula hace un efecto combinado de corte, compresión y extrusión).

Normalmente se registran las curvas fuerza-distancia y lo que se mide es la fuerza máxima alcanzada en el ensayo.

c) Ensayo de cizalla: consiste en aplicar sobre el producto esfuerzos tangenciales y generar una acción de corte que produzca la separación del producto en dos trozos. El equipo más conocido es la célula Warner-Bratzler y se utiliza normalmente para carnes. Con ella se mide normalmente la fuerza máxima necesaria para producir el corte de la muestra, aunque realmente pueden estar produciéndose otros fenómenos como la compresión y extrusión. Dependiendo de la naturaleza reológica del producto, cambiará la relación de las componentes de fuerza de compresión y extrusión.

d) Ensayo de compresión: se comprime la muestra hasta un determinado nivel de deformación pudiendo provocar la ruptura del alimento en trozos. Dependiendo de cómo se programa podemos hablar de ensayos de deformación, ensayos de rotura o ensayos de doble compresión.

En el ensayo de deformación se mide el cambio en las dimensiones del alimento (altura o diámetro) al aplicarle una fuerza. Es un ensayo no destructivo que intenta reproducir la sensación de "blandura" percibida al apretar con la mano un alimento. Puede realizarse aplicando una fuerza constante o una deformación constante. La pendiente de la curva nos proporciona el módulo de elasticidad que nos da una idea de la "deformabilidad" del producto. Las curvas fuerza-distancia obtenidas con este ensayo pueden presentar distintos comportamientos.

Los ensayos de rotura, provocan la deformación y rotura del material. En estos ensayos se determina por un lado el módulo de elasticidad, y por otro la fuerza y distancia de fractura.

Los ensayos de doble compresión, llamados también ensayos TPA "Texture Profile Analysis", permiten obtener siete parámetros texturales muy bien correlacionados con la evaluación sensorial del producto: fracturabilidad, dureza, cohesividad, adhesividad, elasticidad, gomosidad, y masticabilidad.

e) Ensayo de flexión y fractura. se utilizan para productos en forma de barra o láminas, como galletas, pastas, etc. Lo que se mide es la flexión del alimento y/o punto de rotura al aplicar una determinada fuerza.

f) Ensayo de tensión: Son ensayos que no se utilizan mucho con alimentos puesto que la masticación supone una compresión del alimento y no un estiramiento. Se suelen usar para medir la adhesividad de un alimento a una superficie o para materiales de envasado. Para ello se acoplan al equipo unas pinzas que permiten efectuar la tracción.

4.3 Ejemplo real de caracterización de un alimento sólido

Una empresa de repostería utiliza rodajas de kiwi de aproximadamente 1 cm de espesor y 40mm de diámetro para elaborar un pastel. Se plantea usar, en lugar de rodajas frescas, rodajas congeladas-descongeladas. Con idea de ver cómo afecta el tratamiento de congelación-descongelación a sus propiedades mecánicas, se ha realizado un ensayo de compresión con una prensa universal Stable Micro Systems (SMS) modelo Texture Analyser-XT2. Las muestras fueron deformadas con un embolo de 75 mm de diámetro (P/75 de la firma ANAME) hasta un 75% de su altura, a una velocidad de 0.3 mm/s.

Las curvas de compresión fuerza-distancia de avance de la placa obtenidas del ensayo, se transformaron en curvas tensión verdadera (σ)-deformación de Henky (ϵ_H) (ecuaciones 1 y 2), asumiendo que el volumen de la muestra permanecía constante a lo largo del proceso de compresión, lo cual es bastante asumible en muestras no porosas [3, 4].

$$\epsilon_H = \ln \frac{L_0}{L_0 - d(t)} \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A(t)} = \frac{F(t)}{L_0 A_0} (L_0 - d(t)) = \frac{F(t)}{L_0 \pi r_0^2} (L_0 - d(t)) \quad (2)$$

donde:

- L_0 es el espesor inicial de la muestra.
- $d(t)$ es la deformación del espesor de la muestra a cada tiempo.
- $F(t)$ es la fuerza de compresión a cada tiempo.
- $A(t)$ es la superficie en contacto con la placa de compresión a cada tiempo.
- A_0 es la superficie inicial en contacto con la placa de compresión
- r_0 es el radio inicial de la muestra.

La tabla 1 muestra los valores de Fuerza-distancia y esfuerzo-deformación de Hencky, obtenidos del ensayo realizado a las muestras de kiwi.

A partir de las curvas esfuerzo-deformación (figura 3) se obtuvieron los siguientes parámetros: el módulo de elasticidad (E) o pendiente de la zona lineal de la curva, y la tensión de fractura (σ_F) y deformación de fractura (ϵ_{HF}), que se corresponden con puntos de la curva donde la tensión es máxima, a partir de los cuales hay una caída por fractura plástica o macroscópica de la estructura. La tabla 2 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 1. Valores de fuerza, distancia, esfuerzo y deformación obtenidos del ensayo mecánico.

Kiwi Fresco		Kiwi Cong-descongelado		Kiwi Fresco		Kiwi Cong-descongelado	
D(mm)	F(N)	D(mm)	F(N)	σ (kPa)	ϵ	σ (kPa)	ϵ
0	0	0	0	0	0	0	0
0.002	0.004	0.03	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00
0.005	0.013	0.06	0.092	0.01	0.00	0.07	0.01
0.09	0.149	0.12	0.166	0.12	0.01	0.13	0.01
0.12	0.224	0.15	0.202	0.18	0.01	0.16	0.02
0.202	0.412	0.3	0.461	0.32	0.02	0.35	0.04
0.31	0.829	0.48	0.851	0.64	0.03	0.64	0.06
0.42	1.378	0.6	1.136	1.05	0.04	0.84	0.07
0.497	2.01	0.72	1.571	1.52	0.05	1.15	0.09
0.85	7.764	1.02	3.015	5.65	0.09	2.12	0.12
0.877	8.554	1.11	3.629	6.20	0.09	2.52	0.14
0.907	9.322	1.14	3.875	6.74	0.10	2.68	0.14
0.945	10.419	1.17	4.095	7.50	0.10	2.82	0.14
1.212	19.706	1.5	6.605	13.76	0.13	4.35	0.19
1.38	25.951	1.74	7.167	17.77	0.15	4.56	0.22
1.507	30.559	1.86	7.123	20.62	0.17	4.46	0.24
1.637	35.071	2.1	6.978	23.30	0.18	4.21	0.28
1.965	44.046	2.7	7.729	28.10	0.22	4.24	0.37
2.31	52.666	3.06	7.922	32.14	0.27	4.09	0.43
2.627	57.608	3.42	8.189	33.69	0.31	3.96	0.50
2.66	57.893	3.51	8.321	33.70	0.31	3.95	0.52
2.685	57.687	3.54	8.334	33.46	0.32	3.94	0.52
2.717	57.49	3.57	8.317	33.20	0.32	3.91	0.53
2.75	57.288	3.6	8.396	32.93	0.33	3.92	0.53
2.92	55.567	3.78	8.795	31.19	0.35	3.96	0.57
3.067	54.106	3.9	8.922	29.73	0.37	3.92	0.59
3.115	53.68	4.11	9.502	29.29	0.38	3.99	0.64
4.03	48.69	4.68	11.24	22.98	0.52	4.14	0.77
4.48	44.02	5.07	12.416	19.19	0.60	4.13	0.87
5.047	42.304	5.34	13.245	16.51	0.71	4.08	0.95
5.855	44.446	5.58	14.22	14.47	0.89	4.07	1.02
6.035	44.771	5.61	14.391	13.92	0.94	4.08	1.03
6.58	46.838	5.76	15.273	12.52	1.09	4.12	1.08
7.255	50.634	6.15	17.529	10.79	1.32	4.10	1.22
7.337	51.051	6.51	19.886	10.54	1.35	4.00	1.37
7.43	51.187	6.535	19.53	10.18	1.39	3.89	1.39

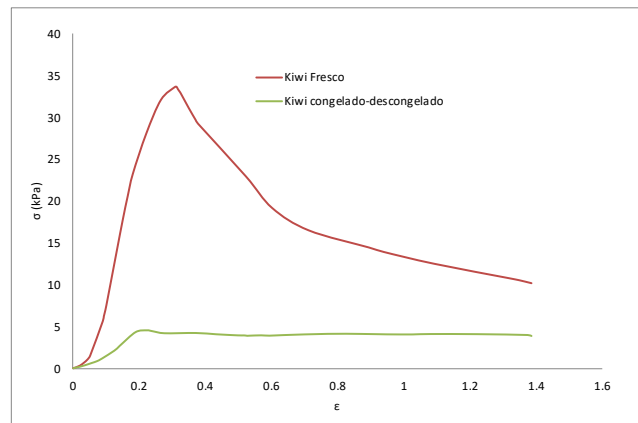


Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los ensayos

Tabla 2. Valores del módulo de elasticidad, tensión de fractura y deformación de fractura para las muestras analizadas

	E (kPa)	σ_F (kPa)	ϵ_{HF}
fresco	111.1	33.70	0.31
fresco-congelado	19.4	4.56	0.22

Como era de esperar, el proceso de congelación-descongelación de la rodaja de kiwi, provoca que disminuya el módulo de elasticidad, el valor de esfuerzo máximo y de deformación máxima, lo que se traduce en muestras menos rígidas, menos resistentes y menos deformables.

5 Cierre

En este objeto de aprendizaje se han expuesto los fundamentos para la caracterización del comportamiento mecánico de un alimento sólido. Se han descrito los principales tipos de ensayos que pueden realizarse para el análisis de las propiedades mecánicas de sólidos y se ha presentado un ejemplo real de caracterización.

6 Bibliografía

- [1] Bourne, M. C. (1982). Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. Academic Press, London and New York. 1-22, 247-279.
- [2] UNE 87001-94 (1994). Análisis Sensorial: Vocabulario. Tomo I – Alimentación. Recopilación de Normas UNE. Ed. AENOR. Madrid. España.
- [3] Peleg, M. (1984). A note on the various strain measures at large compressive deformations. Journal of Texture Studies, 15: 317 –326.
- [4] Dobraszczyk, J.; Vincent, F. V. (1999). Measurement of mechanical. Properties of food materials in relation to texture. The material approach. Food texture: 99-151.