

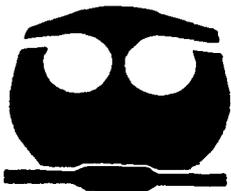


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

REVISIÓN ACTUALIZADA PARA LA EVALUACIÓN
DE CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE LOS
ALIMENTOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUÍMICA DE ALIMENTOS
P R E S E N T A :
INGRID GARCÍA MORENO RUBLI



MEXICO, D. F. EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente: FEDERICO GALDEANO BIENZOBAS
Vocal. FRANCISCO JAVIER CASILLAS GÓMEZ
Secretario: MARÍA VICTORIA COUTIÑO COVARRUBIAS
1er. Suplente: DULCE MARÍA GÓMEZ ANDRADE
2do. Suplente: CARLOS A. TORRES ÁVILA

Sitio donde se desarrolló el tema:
Facultad de Química, U.N.A.M.
Ciudad Universitaria, México, D.F.



Federico Galdeano Bienzobas
(Asesor del tema)



Ingrid García Moreno Rubli
(Sustentante)

Dedico esta tesis con mucho cariño a mis padres por todo el apoyo, su paciencia y principalmente por su amor incondicional.

A Omi por todos los momentos inolvidables de mi niñez, por su eterna sonrisa, y su cariño.

A Astrid porque además de ser mi hermana siempre ha sido una gran amiga y compañera.

A mis amigas y amigos que han estado siempre conmigo.

A Andrés por todo lo maravilloso.

Agradezco principalmente al Ing. Federico Galdeano por su apoyo, paciencia y amistad en la elaboración de este trabajo.

Agradezco el apoyo y las sugerencias de los profesores Francisco Javier Casillas y María Victoria Coutiño.

Agradezco a todos mis profesores de la Universidad y del Colegio.

A Mauricio por su amistad y su gran apoyo en la elaboración de esta tesis.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México.

ÍNDICE

1.	Introducción	2
2.	Objetivos	7
3.	Justificación.....	8
4.	Textura de los Alimentos	9
4.1	Percepción Sensorial de la Textura	9
4.2	Textura, Composición y Estructura de los Alimentos	14
4.3	Evaluación de Textura de los Alimentos	16
4.4	Métodos Sensoriales e Instrumentales para la Evaluación de Textura en los Alimentos	17
4.5	Reología y Textura de los Alimentos	20
4.6	Características de Textura	23
5.	Características de los Alimentos Sólidos	26
5.1	Consideraciones Básicas	26
5.1.1	Fuerza y Tensión	26
5.1.2	Deformación y Tensión	28
5.2	Comportamiento Reológico de los Alimentos Sólidos	32
5.2.1	Determinaciones en Alimentos Sólidos	32
5.2.1.1	Métodos Fundamentales	32
5.2.1.2	Métodos Empíricos	48
5.2.1.3	Instrumentos Imitativos	56
5.2.1.4	Misceláneos	59
5.2.1.5	Equipos Universales o Multi-Propósito	62
6.	Características de los Alimentos Líquidos	71
6.1	Consideraciones Básicas	71
6.1.1	Fluidos Newtonianos	71
6.1.2	Fluidos No-Newtonianos	73
6.2	Comportamiento Reológico de los Fluidos	81
6.2.1	Determinaciones en Alimentos Fluidos	81
6.2.1.1	Métodos Fundamentales	81
6.2.1.2	Métodos Empíricos	90
6.2.1.3	Instrumentos Imitativos	91
7.	Selección del Procedimiento de Prueba Adecuado	94
7.1	Factores que Deben Ser Considerados	94
8.	Principales Parámetros en los Distintos Grupos de Alimentos	98
8.1	Frutas y Vegetales	98
8.2	Productos de Panificación y Pasta	102
8.3	Cárnicos	110
8.4	Lácteos	111
8.5	Correlación entre Métodos Sensoriales e Instrumentales	116
8.5.1	Psicofísica	116
8.5.2	Modelos Psicofísicos de Correlación	117
8.5.3	Ejemplos de Correlación entre Métodos Sensoriales e Instrumentales	118
9.	Conclusiones	121
10.	Anexo	123
11.	Bibliografía	129

1. INTRODUCCIÓN

Los alimentos aportan los nutrientes necesarios para que los seres vivos puedan llevar a cabo todas sus actividades diarias. Los alimentos son fuente de proteínas, hidratos de carbono, lípidos, vitaminas y minerales, sin los cuales el organismo simplemente no puede llevar a cabo sus funciones biológicas básicas. Los hidratos de carbono son la principal fuente de energía y además participan en la formación de sustancias propias del cuerpo como el material genético. Los lípidos son principalmente una fuente energética, y pueden contener vitaminas liposolubles y ácidos grasos esenciales, que son absorbidos por el organismo. Nuestro cuerpo metaboliza y sintetiza proteínas a partir de aminoácidos. Los tejidos, enzimas y hormonas están constituidos por proteínas. Finalmente, las vitaminas y minerales no pueden ser sintetizadas por el organismo, por lo que son indispensables en la dieta, aunque en cantidades muy pequeñas.

Para que los alimentos puedan cumplir con sus respectivas funciones es indispensable que sean ingeridos, proceso que involucra en muchas ocasiones una elección sensorial. Desde el primer instante en que se ve al alimento los seres humanos comenzamos nuestro proceso de selección, o desde que percibimos un aroma agradable o desagradable. En varias ocasiones tenemos la oportunidad de palpar el alimento, por ejemplo en el caso de las frutas, evaluamos su firmeza en el momento de la compra. Al momento de consumir los alimentos estamos también en un proceso de evaluación, nuevamente los vemos, los olemos, sentimos su textura al cortarlos y masticarlos, percibimos su sabor en la boca y finalmente los deglutimos.¹

Los alimentos, además de cumplir con sus funciones biológicas nutricionales básicas son una fuente de placer y estos son elegidos según la percepción que se tiene de ellos durante su consumo. Y es por eso que su presentación dentro de los comercios es muy definitiva en el proceso de selección. Son de gran importancia factores como el envase, la promoción que se les hace, el precio, y donde son colocados dentro de los establecimientos comerciales.

La etapa anterior es importante, sin embargo, el alimento debe cumplir con lo que se prometió en la etapa de selección, es decir, ya que

¹ Szczesniak, A.S., Texture is Still an Overlooked Food Attribute?

el consumidor se enamoró del producto y lo eligió en los anaqueles o en el mercado, el producto debe tener sabor, aroma, textura, etc. acordes con su presentación comercial para así no decepcionar al consumidor y perderlo.

Para cumplir la promesa que hace el producto en el supermercado los alimentos se diseñan a la medida de los deseos del consumidor, proceso en el cual primeramente se involucra la evaluación sensorial, de modo que se descubre qué es lo que los consumidores prefieren, los sabores que les gustan, las texturas, presentaciones, etc. A partir de lo anterior se tiene un perfil del producto y se llevan a cabo pruebas sensoriales e instrumentales a nivel laboratorio utilizando distintos procesos e ingredientes, con el fin de elaborar un alimento que cumpla con el perfil para posteriormente llevarse a escala industrial.

Para la creación e introducción de un alimento al mercado, así como para definir y aumentar las características que lo hacen especial, es necesario que se evalúen sus cualidades por medio de la medición de sus grados de aceptabilidad, el contexto socioeconómico de los consumidores potenciales, lo cual, como se menciona, involucra la evaluación sensorial e instrumental.²

La textura de los alimentos es un parámetro que ha ido adquiriendo mayor importancia en la aceptación de los mismos, ya que en muchas ocasiones es considerada como un factor de calidad o frescura. La textura se percibe a nivel subconsciente, lo que significa que si el alimento tiene la textura esperada por el consumidor éste no la percibirá, pero por el contrario, si ésta no cumple con las expectativas del consumidor será un punto de rechazo y de crítica del producto.

En los países desarrollados, donde el nivel de vida se ha mejorado considerablemente, los factores nutricionales de los alimentos se encuentran cubiertos totalmente, por lo que actualmente los consumidores son más sofisticados y se les pone más énfasis a los aspectos hedónicos como lo son el sabor y la textura.

Con los viajes y la migración de extranjeros a los distintos países, la comida internacional ha adquirido popularidad, se ha dado un intercambio y una adopción de platillos en los distintos países. Por lo

² Hernández Montes, A. El Imperio de los Sentidos.

general los alimentos típicos elaborados tradicionalmente se evalúan sensorialmente en su lugar de origen, pero como han sido adoptados en la dieta de diversos países y procesados industrialmente, las plantas productoras de alimentos preparados buscan constantemente nuevas tecnologías para su evaluación de manera más precisa y rápida.

Los atributos de los alimentos preparados de manera tradicional son distintos a los que se obtienen a un nivel industrial. En los procesos industriales se trabaja bajo condiciones más drásticas, por lo que algunos componentes de los alimentos se transforman o degradan, causando alteraciones en el sabor, el color y la textura. El objetivo de las industrias alimenticias es obtener productos que además de seguros, sean lo más parecidos posible a los que se obtienen de manera tradicional, por lo que se vuelve necesario el uso de distintos aditivos, en este caso particular, el uso de texturizantes. Un ejemplo es el de los productos light o bajos en calorías, los cuales están en auge. Al no adicionar azúcar a los alimentos, como los yogures, éstos se ven modificados en su consistencia, volviéndose muy fluidos, por lo que se les adicionan texturizantes que les devuelven las características texturales a las que el público está acostumbrado. Adicionalmente, su bajo contenido de grasa le resta cuerpo al producto, por lo que es necesario adicionar aditivos como gomas para que el yogurt, mantenga o recupere su cuerpo y sus propiedades de textura. Todos estos esfuerzos para igualar y mejorar la textura, ya sea modificando procesos o utilizando aditivos, deben evaluarse con precisión y exactitud; sensorial e instrumentalmente.^{3,4}

Se ha descubierto que en ciertos países existe una preferencia hacia la consistencia del yogurt: generalmente, los alemanes prefieren el yogurt muy espeso, mientras que los holandeses lo prefieren poco espeso, y por el contrario, los ingleses prefieren el yogurt más fluido. Es importante que se conozcan las preferencias del mercado con respecto al producto para ser capaces de elaborar alimentos a la medida del cliente, ya que el consumidor espera cierta textura y es cada vez más exigente y sensible ante los cambios. Es decir, a mayor parecido entre la textura que se obtiene respecto a la que se espera o conoce a través de

³ Smewing, J., Analyzing the Texture of Pasta for Quality Control

⁴ <http://www.stablemicrosystems.com/apmdec98.htm>

los años, mayor será la aceptación del producto por parte del consumidor.⁵

La evaluación de la textura juega un papel importante desde la elección de la materia prima para la elaboración de los alimentos; cada año se desarrollan nuevas variedades de vegetales y los productores y procesadores se enfrentan al reto de ganar y mantener una posición sana en el sector competitivo de los vegetales, por lo que constantemente buscan métodos más sofisticados para el control de calidad de los productos. En el caso de la carne ocurre lo mismo, ya que el industrial busca la carne que se adapta mejor a su proceso y le da mejores resultados y mayor rendimiento. Durante cada etapa del proceso de elaboración de los alimentos se monitorean los parámetros de calidad de interés, y finalmente se lleva a cabo el control final en el producto terminado que se ofrece al consumidor.⁶

La evaluación instrumental de la textura de los alimentos es una metodología que se utiliza cada vez más en la industria. Los métodos instrumentales para la medición de la textura se fundamentan principalmente en los métodos sensoriales. La tendencia actual es desarrollar equipos cuyo objetivo sea llevar a cabo métodos imitativos, en los cuales las muestras se sometan a condiciones muy similares a las que se someten cuando se consumen. Lo anterior abarca no solamente evaluaciones dentro de la boca, la evaluación sensorial comienza desde que se ven y se huelen los alimentos, se tocan y se presionan con las manos hasta que se ingieren y finalmente se degluten.

Las determinaciones instrumentales tienen la ventaja de ser rápidas, precisas y confiables, por lo que se pueden elaborar metodologías y establecer parámetros estándares. De este modo las pruebas se pueden repetir bajo condiciones estándares establecidas según las necesidades de cada caso, al igual que ocurre con las determinaciones sensoriales. Adicionalmente, la aplicación de métodos instrumentales es económica y rápida, lo cual no significa que los métodos instrumentales desplazarán a los sensoriales. Ambas metodologías se complementan ya que utilizando correctamente los equipos y trabajando con jueces entrenados se pueden establecer correlaciones muy confiables entre los resultados que se obtienen de

⁵ <http://www.stablemicrosystems.com/apmdec98.htm>

⁶ <http://www.stablemicrosystems.com/apmjan99.htm>

ambas maneras. Con una correlación correcta se puede trabajar de manera confiable, ya que los resultados obtenidos de manera instrumental pueden reflejar resultados que se obtendrían sensorialmente.

2. OBJETIVOS

Realizar una revisión bibliográfica actualizada para la evaluación de características reológicas de los alimentos.

Conocer los métodos con que se cuenta y el tipo de alimentos en que se pueden utilizar los mismos.

Conocer que tipo de equipo es el más conveniente por el tamaño de inversión que se haría con su compra y el tipo de institución en cuestión.

3. JUSTIFICACIÓN

Los consumidores actuales demandan alimentos de calidad, lo cual involucra a los aspectos de textura, los cuales contribuyen al interés y variedad de la dieta, y por lo tanto al placer de comer.

La textura de los alimentos es un parámetro que ha ido adquiriendo mayor importancia en la aceptación de los mismos, ya que en muchas ocasiones es considerada como un factor de calidad o frescura. Por lo tanto es primordial que se desarrollen metodologías para evaluar y controlar eficientemente los parámetros de textura.

En el proceso de desarrollo de un alimento se va creando un perfil de producto, el cual incluye características de sabor y textura. Mediante pruebas de análisis sensorial con consumidores y metodologías instrumentales se evalúa si el producto cumple con este perfil y se modifican sus características según sea necesario.

Para la selección de materia prima también se llevan a cabo determinaciones de parámetros clave, ya que de éstos depende el destino que se le da a la materia prima. Para estos fines se han desarrollado pruebas específicas sensoriales e instrumentales, sin embargo en estos casos lo más adecuado es la aplicación de pruebas instrumentales, ya que se trata de evaluaciones de rutina y se manejan volúmenes muy elevados.

El uso de la evaluación instrumental de textura ha ido aumentando en la industria alimentaria debido a que las metodologías instrumentales tienen la ventaja de ser rápidas, precisas y confiables, por lo que las pruebas se pueden repetir bajo condiciones estandarizadas.

Debido a la importancia que ha adquirido la textura en lo que se refiere a la preferencia por los alimentos es una prioridad para el industrial elaborar productos que satisfagan por completo los deseos del consumidor. Existe una gran gama de metodologías sensoriales e instrumentales para trabajar en este objetivo, sin embargo no todas las opciones son necesariamente buenas para alguna aplicación específica, por lo que se deben conocer y analizar posibilidades para hacer una buena elección.

4. TEXTURA DE LOS ALIMENTOS

4.1. PERCEPCIÓN SENSORIAL DE LA TEXTURA

La función principal de los alimentos es proporcionar energía y sustancias químicas al organismo para su crecimiento, mantenimiento y funcionamiento adecuado. Los alimentos no pueden cumplir con esta función al menos que sean ingeridos, proceso que es ayudado por los atributos sensoriales como el color, el aroma, el sabor y la textura.⁷

Las propiedades sensoriales se perciben mediante los sentidos con los que el consumidor evalúa los alimentos, por lo que la textura es una propiedad sensorial de los alimentos. Su medición puede llevarse a cabo mediante el uso del sentido involucrado, que en este caso es el del tacto. Sin embargo, la textura también se puede evaluar indirectamente de forma visual, por ejemplo al vaciar un líquido se ve que si es muy viscoso. El sentido del oído también se ve involucrado, por ejemplo al masticar o morder un alimento crujiente como una barra de granola o una botana.⁸

Mediante la evaluación sensorial se cuantifican y miden los atributos sensoriales de los alimentos y de otro tipo de productos. Las principales características que se miden son:

- **Apariencia:** color, tamaño, forma, conformación y uniformidad.
- **Olor:** aroma debido a una gran cantidad de compuestos volátiles que contienen los alimentos.
- **Gusto:** dulce, amargo, salado y ácido (posiblemente también metálico y astringente, entre otros).
- **Textura:** dureza, viscosidad, granulosidad y gomosidad, entre otros.
- **Sonido:** se relaciona con la textura en los casos de alimentos crujientes.

⁷ Szczesniak, A. S., Texture is Still an Overlooked Food Attribute?

⁸ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

La percepción de la textura generalmente se da a un nivel subconsciente: si la textura del alimento es la que el consumidor conoce y espera, ésta pasa desapercibida, sin embargo, si no es la textura esperada, ésta se convierte en el punto de crítica y muy probablemente de rechazo del alimento.⁹

Las características de textura tienen connotaciones positivas y negativas para el consumidor. Las características de textura universalmente deseadas son jugosidad, ternura, firmeza y que el alimento sea crujiente. Por el contrario, las características que desagradan universalmente al consumidor son dureza, esponjosidad, desmoronamiento, hinchazón, que el producto esté perdiendo agua y viscosidad. Sin embargo, no es posible afirmar que ciertos atributos son universalmente deseados o no deseados, por ejemplo, en algunos alimentos como la manzana, la firmeza es un atributo deseable, mientras que la suavidad del queso crema es un atributo totalmente desagradable en las manzanas. Consecuentemente se ha desarrollado una gran cantidad de pruebas específicas y equipos para cada tipo de alimento.

La aceptación y las actitudes respectivas a la textura varían según factores fisiológicos, sociales, culturales, imitación, factores psicológicos, sexo, clase socioeconómica, la ocasión, intensidad del sabor y la presencia o ausencia de ciertas características de textura:

- **Factores fisiológicos:** se refiere a la facilidad de masticar y deglutir el alimento y al deseo del consumidor de siempre controlar totalmente el alimento dentro de la boca. Sobre todo a los niños pequeños y a los ancianos, les cuesta más trabajo la manipulación de los alimentos dentro de su boca, ya que suelen tener la dentadura incompleta, poca coordinación muscular y frecuentemente heridas en la cavidad bucal.
- **Factores Socioculturales:** La influencia de los padres y amigos modifica los hábitos alimenticios de los niños, así como la propaganda, la vida familiar que cambia y la exposición a distintas texturas. La vida moderna que fomenta la buena condición física ha causado que se prefiera ahora el pan integral al pan suave, o los vegetales menos cocidos.

⁹ Borwankar, R., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review

- **Factores Psicológicos:** Se involucran asociaciones entre la textura de ciertos alimentos y cierto eventos. Por ejemplo, la textura de los ostiones se asocia con suciedad.
- **Factores Socioeconómicos:** El pertenecer a un grupo socioeconómico está relacionado con el grado de escolaridad y el nivel de sofisticación del individuo, esto debido a que el individuo ha tenido mayor oportunidad de vivir distintas experiencias y por lo tanto está más dispuesto a probar nuevos alimentos. A mayor nivel socioeconómico, mayor es la conciencia y la apreciación de la textura.
- **Ocasión:** Por ejemplo, en la hora del desayuno el rango de aceptabilidad de textura es limitado. El consumidor se resiste a probar alimentos nuevos y prefiere los que le lubrican la boca y pueden ser fácilmente deglutidos y digeridos. Por el contrario, a la hora de la comida, el individuo está más dispuesto a probar nuevos sabores y texturas.

A pesar de que frecuentemente se toleren variaciones significativas en la textura, una buena textura es signo de que el alimento es de calidad y que está bien elaborado, como lo exige el consumidor sofisticado actual. En 1972 Szczesniak hizo un estudio con adolescentes, el cual indica que estos adolescentes eran más conscientes de la textura que los adultos, por lo que se concluye que el adulto contemporáneo es más exigente en cuanto a la textura que el de antaño.

Todo indica que los consumidores actuales son más sofisticados y demandan alimentos de calidad, por lo que están dispuestos a pagar un precio elevado. En la sociedad de los países desarrollados, el abasto y el valor nutricional son algo sobreentendido, por lo que los aspectos hedónicos van adquiriendo cada día más importancia. Los aspectos texturales contribuyen al interés y variedad de la dieta, y por lo tanto al incremento del placer al comer.¹⁰

PERCEPCIÓN DE LA TEXTURA DURANTE LA MASTICACIÓN

Para comprender la evaluación de la textura de los alimentos es necesario entender el proceso mediante el cual se evalúan los mismos y

¹⁰ Szczesniak, A. S., Texture is Still an Overlooked Food Attribute?

el aparato sensorial involucrado. La evaluación de la textura es dinámica y se da principalmente en la boca durante la masticación.¹¹

Las principales funciones del proceso de masticación son:

- Romper y lubricar el alimento para que sea fácilmente deglutido.
- Mezclar el alimento con las enzimas de la saliva.
- Incrementar la superficie de contacto de modo que el alimento sea más susceptible al ataque de las secreciones gástricas.
- Ajustar la temperatura del alimento a una temperatura cercana a la del cuerpo, esto es posible debido a que la boca es la parte del cuerpo que tolera el mayor rango de temperaturas.
- Liberación del sabor, algunas sustancias responsables del aroma y sabor se liberan cuando el alimento se fragmenta.
- Placer, es una experiencia sensorial placentera que proporciona satisfacción.¹²

Las estructuras involucradas en la masticación y preparación del alimento para ser deglutido son las siguientes:

- **Dientes:** Son el principal agente para la masticación y el rompimiento de los alimentos.
- **Labios:** Rodean la boca y permiten la entrada de alimentos líquidos a la cavidad bucal, ayudan a que el alimento no salga de la boca durante la masticación. Tienen una gran gama de receptores sensitivos para percibir la temperatura y las propiedades de textura de los alimentos. Tienen un tacto muy agudo, incluso son más sensibles que las puntas de los dedos.
- **Paredes de la Cavidad Bucal:** Las paredes laterales de la cavidad bucal están formadas por capas externas de piel,

¹¹ Borwankar, R., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review

¹² Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

grasa subcutánea, músculos asociados a la masticación y la gesticulación y cubiertas internas de epitelio estratificado. Las paredes de la cavidad bucal mantienen el alimento dentro de la misma y lo regresan a los dientes entre mordida y mordida.

- **Lengua:** Es un órgano muscular cuya base es el "suelo" de la boca. Prácticamente llena la cavidad bucal cuando la boca se encuentra cerrada. La lengua, junto con los dientes realiza movimientos neuromusculares coordinados y regresa el alimento a los dientes entre mordida y mordida, participando activamente en la mezcla de la saliva con el bolo. La lengua rompe alimentos suaves presionándolos contra el paladar y es el órgano de mayor responsabilidad para la percepción de superficies y propiedades geométricas, ya que es la parte del cuerpo con mayor sensibilidad al tacto.
- **Paladar:** Está dividido en dos secciones, el paladar duro, que está en la parte frontal de la cavidad bucal, consiste de un esqueleto duro cubierto por una fina capa de tejido suave. Separa la cavidad bucal de la nasal y es una superficie apta en la cual la lengua puede presionar alimentos. El paladar suave está en la parte trasera de la boca y consiste de una membrana con músculos, capilares, nervios, tejidos linfáticos y glándulas mucosas. Durante la deglución se eleva cerrando la cavidad nasal.
- **Encías:** Están compuestas por tejido fibroso, contienen receptores sensitivos y rodean a los dientes dándoles soporte.
- **Glándulas Salivales:** Secretan la saliva que hidrata el alimento, lubrica el bolo y comienza la digestión de los carbohidratos.
- **Mandíbula Superior:** En ella se encuentran anclados los dientes y permanece prácticamente inmóvil durante la masticación.
- **Mandíbula inferior:** En ella se encuentran anclados los dientes y se mueve principalmente de manera vertical a velocidad sinusoidal. Una gran cantidad de músculos es

responsable del movimiento de la mandíbula inferior, y el más potente es el músculo masetero.

- **Cavidad Bucal:** Contiene la lengua y los dientes y dentro de ella se lleva a cabo todo el proceso de la masticación.
- **Faringe:** Es la cavidad que se encuentra atrás de la boca y conecta las cavidades bucal y nasal con la laringe y el esófago. Cuando la lengua empuja el bolo hacia la faringe, se inicia el reflejo de la deglución.¹³

Durante la masticación en la boca se da una serie de acontecimientos de deformación y ruptura. Sin duda, los dientes juegan uno de los papeles principales en este proceso y por lo tanto también en la percepción de la textura. La masticación de una galleta requiere al inicio de mayor fuerza, sin embargo tiene una duración muy corta. Por otra parte, la zanahoria y la carne se mastican al inicio con menor fuerza que la galleta, la fuerza va disminuyendo, sin embargo el tiempo de masticación es considerablemente mayor.¹⁴

4.2. TEXTURA, COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS ALIMENTOS

En la mayoría de los procesos de elaboración de alimentos el objetivo es cambiar la textura del mismo, por lo general, la tendencia es debilitar su estructura con el fin de hacer más sencillo el proceso de la masticación. A pesar de que en muchos procesos se quiera cambiar la textura, en algunos casos esta modificación no es deseable, un ejemplo sería el caso del ablandamiento en productos enlatados o congelados.

La textura de los alimentos se modifica en los procesos de preparación, como la fritura, la cocción y el asado. Los procesos industriales de preparación de los alimentos difieren de los caseros, ya que el alimento debe tener una larga vida de anaquel, por lo que el proceso es más drástico. Como consecuencia de lo anterior, el sabor y la textura de los alimentos elaborados industrialmente difieren considerablemente de los de los alimentos elaborados de forma casera o tradicional.

¹³ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

¹⁴ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

Los alimentos se pueden clasificar en dos grupos, dependiendo si la textura se puede controlar o no.

- **Alimentos nativos o naturales:** en estos alimentos la textura permanece prácticamente intacta. En este tipo de productos, se debe tomar lo que la naturaleza proporciona como lo son las frutas, el pescado, la carne, etc. Solamente se cambia la textura mediante métodos tales como el procesamiento térmico, el frío y la reducción del tamaño de partícula.
- **Alimentos preparados:** son los que se procesan a partir de un número de ingredientes para obtener un producto que no se encuentra en la naturaleza. Algunos ejemplos son la salsa catsup, el helado, la mayonesa, etc. En este tipo de productos es posible cambiar la formulación mediante el número, cantidad y calidad de los ingredientes utilizados, además de las variables del procesamiento, por lo que se cuenta con mucho más opciones para controlar y modificar la textura.¹⁵

La formulación de un alimento especifica las moléculas que forman parte del mismo y el procesamiento conlleva a las moléculas a la formación de determinadas estructuras. No todos los alimentos se elaboran a partir de ingredientes puros; de hecho, la mayoría se elabora a partir de productos de origen animal y vegetal. Estos ingredientes son en sí un ensamble de moléculas con su estructura y textura respectivas. Al combinarse estos ingredientes y/o procesarse, su estructura se modifica, del mismo modo que su textura.

La composición de los alimentos y su estructura determinan su comportamiento reológico. Podría decirse que la reología de un producto alimenticio, sola o en combinación con las moléculas que éste contiene, y su estructura, determinan su textura. Sin embargo, debe tenerse presente que la textura se percibe dinámicamente, durante el consumo de los alimentos, éstos van sufriendo varios cambios debidos a la masticación, la mezcla con la saliva y los cambios de temperatura.¹⁶

¹⁵ Sánchez, M.T.T., Food Texture: Concept and Measurement

¹⁶ Borwankar, R., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review

Los cambios en los hábitos alimenticios han fomentado el uso de nuevos ingredientes en la industria. En los últimos años se despertó un gran interés en la reducción de calorías, y los edulcorantes no nutritivos desempeñaron un buen papel como tales, sin embargo éstos no cuentan con otras características funcionales de los edulcorantes naturales como el azúcar de caña, entre ellas la retención de agua o la capacidad de modificar la textura. Lo mismo ocurre con el uso de sustitutos de grasa o el uso de fibra dietética, por lo que se suscitó un gran interés en los estudios de textura en los alimentos y la búsqueda de las características funcionales de la grasa y el azúcar en otros ingredientes.¹⁷

Con el avance de la tecnología de los alimentos se han ido descubriendo y utilizando aditivos en la elaboración de los alimentos con el fin de que éstos se asemejen lo más posible a los alimentos preparados en forma casera o tradicional. En este caso, los aditivos de interés son los que se utilizan para mejorar la textura de los alimentos:

- **Hidrocoloides:** funcionan como espesantes, gelificantes, emulsificantes, texturizantes y retenedores de humedad. Algunos ejemplos son la goma de Xantana, la goma Guar, la CMC, y las pectinas.
- **Fosfatos:** se utilizan para regular el pH y retener humedad aumentando el rendimiento.
- **Antihumectantes:** Evitan que los polvos se aglomeren y funcionan como fluidificantes de los mismos, como el silicoaluminato de sodio.

Con el fin de saber si las características del proceso son las adecuadas y qué tan bien están desempeñando su función estos aditivos se deben llevar a cabo evaluaciones, que por lo general son de tipo sensorial, sin embargo, la aplicación de métodos instrumentales ha aumentado.¹⁸

4.3. EVALUACIÓN DE TEXTURA DE LOS ALIMENTOS

La evaluación de la textura es de gran importancia en la cadena de la elaboración de alimentos. Desde la materia prima comienza la

¹⁷ Szczesniak, A.S., Texture is Still an Overlooked Food Attribute?

¹⁸ Cerón, E. Exposición ATAM 2000

elección de los ingredientes y se define el destino y el precio que tendrán los productos. Por ejemplo, las frutas que son demasiado suaves e incluso se han deformado se utilizan solamente para hacer mermeladas, jugos o jarabes y no para congelarse.

Un buen ejemplo son los chícharos, que han sido de los productos más estudiados. La terneza de los chícharos disminuye con su maduración y por otra parte el rendimiento de la cosecha se incrementa, por lo que se vuelve crítica la determinación de la madurez para cosechar los chícharos con mejor calidad y rendimiento. El procesador paga al cultivador el precio por peso en una escala relacionada con la terneza del producto.¹⁹

4.4. MÉTODOS SENSORIALES E INSTRUMENTALES PARA LA EVALUACIÓN DE TEXTURA EN LOS ALIMENTOS

El mundo se va haciendo pequeño: junto con los inmigrantes extranjeros, los viajes, y el comercio, los alimentos también han atravesado fronteras y se han hecho populares. Tal es el caso de la pasta, el sushi, los tacos y muchos otros alimentos típicos. Estos alimentos han sido adoptados en la dieta de diversos países, lo cual ha causado que en la industria alimenticia se busquen nuevas metodologías de control de calidad tan efectivas como la evaluación sensorial, tradicionalmente utilizada en los países de los que son originarios los alimentos en cuestión. Sin embargo en países extranjeros no se conocen a la perfección las características de alimentos tradicionales de otros países, por lo que en estos casos es necesario conocer correlaciones con métodos instrumentales a partir de los resultados sensoriales del lugar de origen, de este modo se aprovecha la ventaja que presenta la existencia de ambas metodologías complementarias. Con el fin de asegurar una calidad óptima, sabor y características auténticas en los productos alimenticios se está incrementando el uso de los métodos de análisis instrumental, ya que éstos son rápidos, precisos y proporcionan información reproducible.²⁰

¹⁹ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

²⁰ Smewing, J. American Association of Cereal Chemists, Inc., Analyzing the Texture of Pasta for Quality Control

MÉTODOS SENSORIALES PARA LA EVALUACIÓN DE TEXTURA DE LOS ALIMENTOS

Desde 1975 la evaluación sensorial fue mundialmente aceptada como una disciplina científica empleada para evocar, medir, analizar e interpretar características de los alimentos y materiales como son percibidos por los sentidos de la vista, el olfato, el gusto, el tacto y el oído.²¹

La evaluación sensorial se ocupa de la medición y cuantificación de las características de productos, ingredientes o modelos mediante la percepción de los sentidos. Como se mencionó previamente, las principales características que se estudian en la evaluación sensorial son: apariencia, olor, gusto, textura y sonido

La aplicación de métodos sensoriales es compleja en el establecimiento de atributos que contribuyen a la calidad de los alimentos; consume mucho tiempo, implica mucho trabajo y además está sujeta al error debido a la variabilidad del juicio humano, y por lo tanto es costosa. Sin embargo, no existe ningún instrumento que pueda sustituir el dictamen humano al 100%. Los análisis colorimétricos, texturométricos y químicos proporcionan buenas correlaciones unidimensionales de los atributos sensoriales individuales asociados con el color, la textura y el sabor. Los análisis físicos y químicos proporcionan resultados de parámetros totalmente aislados, por ejemplo la fuerza de cizallamiento. En cambio, las respuestas sensoriales son más complejas debido a la integración simultánea de señales múltiples, las cuales el juez asocia con experiencias pasadas y efectos contextuales.

La evaluación sensorial recurre al estudio de disciplinas como:

- **Psicología:** estudia el comportamiento humano sobre todo en cuanto a la percepción y la motivación.
- **Fisiología:** se enfoca a la función de los sistemas sensoriales.
- **Química:** en cuanto al conocimiento de la composición de compuestos que inducen respuestas sensoriales.

²¹ Hernández Montes, A. El Imperio de los Sentidos.

- **Física:** estudia aspectos físicos del estímulo y la mecánica de medición.
- **Estadística:** es una herramienta indispensable para el establecimiento de validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.²²

Existen distintas maneras de clasificar las pruebas sensoriales, una es de acuerdo a los tipos de jueces empleados:

- **Evaluación Sensorial I:** utiliza jueces entrenados.
- **Evaluación Sensorial II:** emplea consumidores.

Otra clasificación se basa en agrupar las pruebas sensoriales según el tipo de pregunta que contestan los jueces, lo cual permite clasificar las determinaciones sensoriales en:

- **Discriminativas:** ¿Las muestras son sensorialmente diferentes?
- **Descriptivas:** ¿Qué hace diferentes a las muestras?
- **Afectivas:** ¿Qué tanto se aceptan o prefieren las muestras?
- **De Calidad:** ¿La muestra cumple con las especificaciones?

Existen relaciones entre ambas clasificaciones, por ejemplo, una prueba discriminativa puede caer dentro la Evaluación Sensorial I o la II, dependiendo del tipo de juez. Por ejemplo, el perfil de sabor pertenece a la Evaluación Sensorial I y a las pruebas discriminativas.²³

El científico moderno debe tener la capacidad de diseñar, llevar a cabo y evaluar analítica y científicamente las pruebas sensoriales: debe efectuarlas con rigor científico. Las pruebas sensoriales no se pueden efectuar por cualquier persona, en cualquier lugar, a cualquier hora y de cualquier forma éstas deben realizarse en lugares, horas y formas

²² Pedrero, D. Y Pangborn, R. Evaluación Sensorial de los Alimentos, Métodos Analíticos.

²³ Hernández Montes, A. El Imperio de los Sentidos.

específicas. Al igual que cuando se llevan a cabo análisis químicos o físicos, la evaluación sensorial requiere de instalaciones, equipo y material específicos para controlar el procedimiento y las variables que entran en juego. El análisis sensorial se basa en los mismos principios científicos que los análisis instrumentales: control de proceso y variables involucradas, por lo que es indispensable que se controlen las personas analistas, el lugar, la hora, forma y el material adecuado para las pruebas sensoriales. Todo lo anterior para tener la seguridad de que las respuestas obtenidas en la evaluación sensorial sean confiables, reproducibles y útiles en la toma de decisiones.²⁴

La desventaja principal de la evaluación sensorial es que además de consumir mucho tiempo, los sentidos en el humano se saturan. Las personas se cansan después de cierto número de determinaciones, lo cual no ocurre con los equipos por lo que se recomienda que para las determinaciones en línea se utilicen métodos instrumentales.

MÉTODOS INSTRUMENTALES PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ALIMENTOS

Los métodos instrumentales para la evaluación de los alimentos se han ido desarrollando durante los últimos 100 años. Su uso se ha incrementado debido a que se obtienen resultados precisos y repetibles, además de que estas metodologías requieren menos tiempo que la evaluación sensorial. Con el transcurso del tiempo los equipos para las determinaciones de textura en alimentos se han ido perfeccionando y especializando, como se verá a lo largo de este escrito.

4.5. REOLOGÍA Y TEXTURA DE LOS ALIMENTOS

REOLOGÍA

La reología es la rama de la física que estudia la deformación y el flujo de la materia sólida o líquida. La reología incluye el estudio de la deformación elástica y otros fenómenos no necesariamente asociados con el flujo de la materia.

La materia se deforma o fluye solamente cuando una fuerza actúa sobre ella, la fuerza puede aplicarse deliberadamente, accidentalmente o

²⁴ Pedrero, D. Y Pangborn, R. Evaluación Sensorial de los Alimentos, Métodos Analíticos.

puede estar impregnada en la materia, como en el caso de la gravedad. La reología involucra fuerzas y deformaciones, pudiendo incluir tiempo y otros parámetros secundarios.

TEXTURA DE LOS ALIMENTOS

En los alimentos el comportamiento reológico está directamente relacionado con las características de textura. Por ejemplo, el consumidor evalúa la firmeza de las frutas presionándolas con los dedos. De lo anterior se tiene que la textura es el comportamiento mecánico de los alimentos medido sensorialmente (fisiológica y psicológicamente) o físicamente (reológicamente). La textura de los alimentos es una propiedad compleja que involucra varios parámetros físicos interrelacionados entre sí, de los cuales la viscosidad es de gran importancia en los líquidos y la elasticidad en los sólidos.²⁵

TEXTURA

En 1969 con el advenimiento del *Journal of Texture Studies*, se acordó que la **textura** es la división principal de la calidad sensorial que cubre todas las respuestas cinéticas de los alimentos sin importar el estado en que se encuentren.

Según la Organización Internacional de Estandarización, la **textura** comprende todos los atributos reológicos y estructurales (geométricos y de superficie) perceptibles de los alimentos; ya sea mediante receptores mecánicos, táctiles y en algunos casos auditivos y visuales. La percepción de la textura de los alimentos se lleva a cabo de una manera dinámica, durante el consumo de los mismos.²⁶

Del mismo modo, que la textura se distingue de los demás atributos sensoriales principales, también difiere de características como el aspecto visual. Otros atributos tales como la sensación de frío, calor, o aceitosidad pueden clasificarse bajo los términos de sabor o de textura.

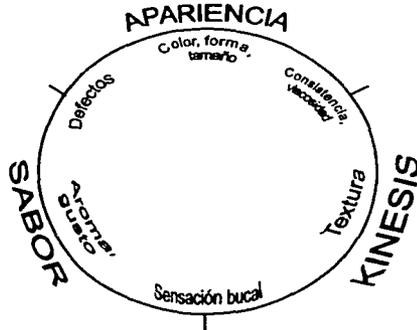
En este estudio, la definición de **textura** se limita a la sensación del tacto o del sentimiento por la mano humana y las partes de la boca,

²⁵ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

²⁶ Borwankar, R., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review

ya que los atributos de los alimentos no se perciben ordinariamente por otros órganos humanos antes o durante la masticación.

Toda definición debe ser arbitraria, sin embargo, los atributos primarios y secundarios de calidad no son totalmente independientes y pueden traslaparse e influirse entre sí. Kramer representó la calidad sensorial en forma de un círculo, con los atributos primarios de apariencia, cinética, y sabor, compartiendo la periferia del anillo. Existe una zona de traslape entre apariencia y textura, en la cual se pueden colocar términos tales como consistencia y viscosidad, ya que éstos pueden ser clasificados bajo apariencia y bajo textura. En la parte en que se juntan la textura y el sabor existe un traslape similar, donde se coloca el término de sensación bucal.



Debido a la inevitable existencia de estos traslapos, se ha llegado al acuerdo general de que la textura, más que kinesis, o haptaestesis es una de las tres propiedades sensoriales primarias de los alimentos que se relaciona totalmente con el sentido del tacto, y es por lo tanto, capaz de proporcionar mediciones correctas en términos mecánicos de unidades de masa o de fuerza. Los términos psicológicos y físicos equivalentes son la kinesis (sentido del músculo), la haptaestesis (sentido de la piel) y la reología (deformación o flujo de la materia), respectivamente.²⁷

²⁷ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

4.6. CARACTERÍSTICAS DE TEXTURA

Las características de textura de los alimentos se dividen en tres clases:

- **Características Mecánicas:** Están relacionadas con la reacción del alimento a una fuerza aplicada y se determinan cuantitativamente mediante el uso de escalas estándares, análogas a la escala de dureza utilizada por los mineralogistas. La escala estándar de dureza para alimentos consta de nueve productos que van de baja dureza (queso crema Filadelfia) a alta dureza (dulces de caramelo). Existen otras escalas como la de fracturabilidad, masticabilidad, gomosidad, adhesividad y viscosidad. Los alimentos que se utilizan como referencia deben ser muy conocidos en la región en que se aplica la escala.
- **Características Geométricas:** Están relacionadas con el ordenamiento de los constituyentes físicos del alimento, como el tamaño, la forma, la rugosidad de la superficie, etc. Las características geométricas son en parte cualitativas y en parte cuantitativas.
- **Características Químicas:** Estas características están relacionadas con la humedad o el contenido de grasa de la muestra que se percibe mediante los sentidos humanos. Estos términos no son los mismos que la humedad o el contenido de grasa determinados mediante análisis químicos. Por ejemplo, mediante análisis químicos dos manzanas pueden tener el mismo contenido de humedad, sin embargo, en la evaluación sensorial una manzana pudo resultar seca y harinosa, mientras que la otra resultó jugosa y húmeda.²⁸

Para hacer evaluaciones de textura en productos alimenticios, es necesario clasificar las características de textura en categorías lógicas. Las características de textura se perciben en cuatro distintas etapas:

²⁸ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

1. **Percepción inicial:**
En esta etapa se consideran el aspecto visual, las características al rebanar, untar y servir.
2. **Percepción inicial en el paladar:**
En este punto se observan las características analíticas que abarcan el tamaño de partícula, su distribución y forma, el contenido de aire, el tamaño de las celdas de aire, su distribución y tamaño. También se consideran los parámetros reológicos básicos como la elasticidad, viscosidad y adhesividad.
3. **Percepción durante la masticación:**
En este punto se perciben propiedades derivadas de una mezcla compleja de dos o más atributos de elasticidad, viscosidad y adhesividad, los cuales comprenden dureza, fracturabilidad, gomosidad y masticabilidad.
4. **Impresión residual de la masticación:**
Aquí se incluyen atributos como la aceitosidad.

DEFINICIONES DE LAS CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE TEXTURA

CARACTERÍSTICA	FÍSICAMENTE	SENSORIALMENTE
Primarias:		
Dureza	Es la fuerza que se necesita aplicar sobre una muestra para que se provoque una deformación determinada	Es la fuerza que se requiere para comprimir una sustancia entre los dientes (sólido) o entre la lengua y el paladar (líquido). Para la evaluación de muestras sólidas la muestra se coloca entre los molares y el panelista muerde uniformemente, evaluando la fuerza requerida en la compresión de la muestra. En el caso de muestras semisólidas, la muestra se evalúa comprimiéndola en el paladar con la lengua
Cohesividad	Es el grado hasta el cual un material puede deformarse antes de que se fracture.	Es el grado hasta el cual una sustancia se comprime entre los dientes antes de romperse. La técnica sensorial que se utiliza es mediante una escala de referencia con productos conocidos.
Viscosidad	Es el grado de flujo por unidad de fuerza.	Fuerza requerida para hacer fluir un líquido de la cuchara a la lengua. La técnica para la evaluación de viscosidad es colocando una cuchara con el alimento frente a la boca y sorber el líquido a través de la lengua. El grado de viscosidad se mide como la fuerza requerida para aspirar el líquido.
Elasticidad	Grado al cual un material deformado regresa a su estado original después de que se le retira la fuerza aplicada	Grado al cual un producto regresa a su forma original una vez que ha sido comprimido entre los dientes. La técnica sensorial que se utiliza es mediante una escala de referencia con productos conocidos.
Adhesividad	Es el trabajo necesario para superar las fuerzas de atracción entre la superficie del alimento y la de otro material que entra en contacto con el alimento	Es la fuerza requerida para remover el alimento adherido a la boca durante la masticación. La determinación se lleva a cabo colocando el alimento en la boca y presionándolo contra el paladar para finalmente evaluar la fuerza requerida para remover el alimento con la lengua.
Secundarias:		
Fracturabilidad	Es la fuerza requerida para fracturar un material, se da en productos con un elevado grado de dureza y poco cohesivos.	Es la fuerza con la cual una muestra se desmorona o se quiebra. Para la determinación de fracturabilidad la muestra se coloca entre los molares y el panelista muerde uniformemente hasta que la muestra se desmorona o se quiebra.
Masticabilidad	Es la energía requerida para masticar un alimento hasta un estado en el que está listo para deglutirse; es un producto de dureza, cohesividad y elasticidad.	Es el tiempo necesario de masticación de una muestra a un grado constante de aplicación de fuerza, para que su consistencia sea adecuada para deglutirse. También se puede determinar mediante el número de "masticadas" en un tiempo. Para la evaluación la muestra se coloca en la boca y se mastica a un grado de una masticada por segundo.
Gomosidad	Es la energía requerida para desintegrar un alimento semisólido a un estado en que esté listo para ser deglutido, es un producto de un bajo grado de dureza y elevada cohesividad.	Es la densidad que persiste después de la masticación o la energía requerida para desintegrar un alimento semisólido para que pueda ser deglutido. La determinación se lleva a cabo colocando la muestra en la boca y moviéndola entre la lengua y el paladar. El grado de gomosidad es el grado de manipulación requerido antes de la desintegración.

²⁹ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS ALIMENTOS SÓLIDOS

5.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS

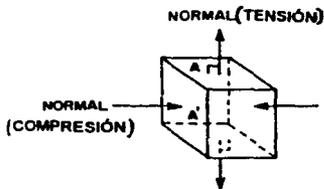
5.1.1. FUERZA Y TENSIÓN

Quando una fuerza externa actúa sobre un cuerpo se pueden distinguir varios tipos de esfuerzo: tensión, compresión y cizallamiento. El doblado involucra tensión y compresión, la torsión involucra cizallamiento y la compresión hidrostática involucra los tres. Todos los demás casos involucran cualquiera de estos tres factores aisladamente o en combinación. Además, el peso o la inercia de un cuerpo pueden constituir una fuerza que conlleva a su deformación. Pero en general, las fuerzas externas son de magnitudes mucho mayores y el peso no se toma en consideración. Las fuerzas que actúan sobre un cuerpo se expresan en gramos (g) o libras (lb). El esfuerzo o la tensión es el factor de intensidad de la fuerza y se expresa como fuerza por unidad de área, de manera similar a la presión.

FUERZAS Y ESFUERZOS NORMALES

Las fuerzas y esfuerzos normales son perpendiculares a la superficie sobre la cual actúan, éstas se subdividen en dos:

- **Fuerza de compresión:** Los componentes de la tensión están dirigidos en ángulo recto hacia el plano sobre el cual actúan.
- **Fuerza de tensión:** Los componentes de la tensión salen perpendicularmente del plano sobre el cual actúan.³¹

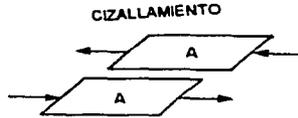


³⁰ Sánchez, M.T.T., Food Texture: Concept and Measurement

³¹ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

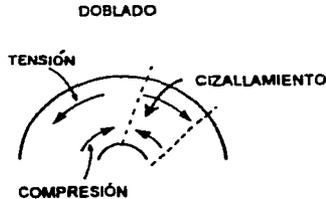
FUERZAS Y ESFUERZOS DE CIZALLAMIENTO

Las fuerzas de cizallamiento son paralelas o tangenciales a la superficie sobre la cual actúan y utilizan las mismas unidades que las fuerzas y esfuerzos normales, pero el área que se utiliza para los cálculos es paralela a su dirección.³²



FUERZAS Y ESFUERZOS COMBINADOS Y LOCALES

En la mayoría de los cuerpos la aplicación de una fuerza externa causa distintos tipos de esfuerzo interno. Un buen ejemplo es el doblado, donde se desarrollan el esfuerzo de compresión, tensión y cizallamiento.



Al hacer referencia de un esfuerzo como se ha descrito anteriormente se está considerando solamente un promedio ideal de intensidad en la fuerza aplicada. Este cálculo de esfuerzo es de gran utilidad para propósitos prácticos y es una herramienta efectiva y conveniente para el análisis del desempeño de sistemas mecánicos. Al cargar un cuerpo verdadero con un peso, especialmente si éste tiene irregularidades estructurales, la distribución interna del esfuerzo estará

³² Moskowitz, Howard, Food Texture Instrumental and Sensory Measurements

muy lejos de ser uniforme, y en algunos casos puede llegar a darse una concentración de esfuerzo en las partes donde la intensidad exceda por mucho al esfuerzo promedio.

5.1.2. DEFORMACIÓN Y TENSIÓN

La distinción o "la frontera" entre lo que son los alimentos sólidos y fluidos no siempre es clara ni precisa y consecuentemente se dan algunos traslapes en la discusión de ambos tipos de alimentos. Los atributos de mayor importancia de los alimentos sólidos son la elasticidad y la plasticidad.

ELASTICIDAD

Cuando un cuerpo es perfectamente elástico la deformación o esfuerzo debido a la aplicación de una fuerza ocurre instantáneamente y esta deformación desaparece completamente e instantáneamente cuando se retira la fuerza. Generalmente se asume que existe una relación uno a uno entre el estado de tensión y el de deformación en un cuerpo elástico.

Al cambiar las dimensiones de un cuerpo éste se deforma, como ocurre en una prueba de tensión cuando un cuerpo de longitud L se somete a tensión lineal, o en el caso de una compresión, donde se disminuye su longitud en la dirección de la fuerza aplicada. Entonces la deformación lineal ΔL se puede expresar en forma de cociente o porcentaje (ϵ):

$$\epsilon = \Delta L / L$$

De aquí se deriva el coeficiente de Young, que se obtiene dividiendo el esfuerzo entre la deformación:

$$E = \sigma / \epsilon$$

33 34

³³ Moskowitz, Howard, Food Texture Instrumental and Sensory Measurements
³⁴ www.ec.washington.edu/class/539/Lectures/lecture7/sld005.htm

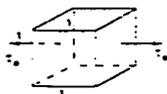
Cuando se le aplica una fuerza de compresión o elongación a un material completamente elástico se provoca una cierta deformación pequeña, la cual desaparece completamente cuando se retira la fuerza. Se trata de un proceso reversible que no requiere de trabajo. El prototipo ideal de un sólido elástico se basa en la ley de Hooke:

$$\sigma = E(\Delta l/l_0) = E(\lambda - 1)$$

donde σ es el esfuerzo de elongación o compresión, E el coeficiente de Young y λ la longitud a la que se extiende o comprime el cuerpo.

Además, un sólido elástico ideal debe cumplir con las siguientes condiciones:

- La deformación debe ser proporcional a la fuerza aplicada
- Se debe recuperar completamente de la deformación cuando se retira la fuerza
- La deformación original y su recuperación de deben retardarse debido a viscosidades internas del material.³⁵



Si el material en cuestión no es perfectamente elástico, éste tardará un tiempo en recuperarse de la deformación después de que se le haya retirado la fuerza aplicada.

Además de la deformación lineal existen otros tipos de deformación, como la deformación volumétrica ($\Delta V/V$) que se produce en las pruebas hidrostáticas. En los líquidos la deformación es mucho

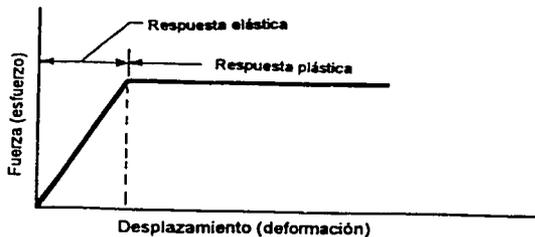
³⁵ Borwankar, R., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review

mayor, y ya no se habla de una deformación, se trata de un grado de deformación $\dot{\epsilon}$, la derivada de la deformación con respecto tiempo:

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$$

PLASTICIDAD

Los materiales plásticos no se recuperan de la deformación causada por la fuerza aplicada ya que se ha alcanzado y excedido un valor de esfuerzo de rendimiento. Cuando se llega a este punto, el cuerpo no recupera su forma original al retirarse la fuerza aplicada: ocurre una deformación plástica, la cual involucra una ruptura estructural, que en casos extremos puede ser macroscópica. El comportamiento de un material plástico ideal se representa mediante la siguiente figura.



36 37

SÓLIDOS vs. LÍQUIDOS

El límite de distinción entre lo que es un material sólido y un material líquido es un tanto ambiguo, por lo que se han hecho muchos intentos por clasificar los materiales, en este caso los alimentos. Una manera, es clasificando a los alimentos semi-sólidos como los que no fluyen como líquidos pero que se deforman mucho mediante la aplicación de esfuerzos moderados, tales como la fuerza de gravedad, entre estos

³⁶ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

³⁷ Borwankar, R., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review

alimentos se encuentran las gelatinas, la crema de cacahuete, y los pudines.

En otra clasificación se sugiere que los materiales que presentan valores de módulo de cizallamiento menor a 10^9 dina/cm² son sólidos viscoelásticos, sin embargo esta clasificación es un tanto arbitraria, ya que el módulo de elasticidad de un material puede depender mucho de las condiciones de prueba como ocurre en la deformación uniaxial.

Otras categorías hablan de "alimentos compuestos" o de "sistemas dispersos" y éstos son principalmente líquidos por su comportamiento pero contienen cantidades perceptibles de partículas no-líquidas, como algunas sopas, purés, espumas y salsas.

Los materiales reales pueden presentar propiedades o combinaciones de propiedades de sólidos y de líquidos de manera simultánea. La propiedad predominante depende del esfuerzo que se aplica y de la duración del mismo. En la vida real se distinguen los sólidos y los líquidos por su respuesta a esfuerzos o tensiones bajos, generalmente determinados por la fuerza de gravedad, y durante un intervalo de tiempo muy corto. Sin embargo, al aplicar un rango amplio de esfuerzo dentro de un periodo largo de tiempo utilizando un equipo reológico se pueden observar propiedades de líquidos en materiales sólidos y viceversa. De lo anterior surgen dificultades para la distinción de materiales sólidos y líquidos, por lo tanto, es mucho mejor clasificar los materiales bajo el criterio de comportamiento reológico. De este modo es posible clasificar un material determinado en más de una categoría, dependiendo de las condiciones experimentales.³⁸

La escala del tiempo en reología se obtiene mediante el número de Deborah, que es un número adimensional representado por la siguiente expresión:

$$De = \tau/T$$

Donde T es un tiempo característico del proceso de la deformación observada y τ es el tiempo característico del material. Los materiales con número de Deborah alto presentan un comportamiento de tipo sólido y los materiales con un número de Deborah bajo se comportan como líquidos. Un material puede parecer sólido ya sea

³⁸ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

porque tiene un tiempo característico largo o porque el proceso de deformación que se está utilizando es demasiado rápido. Por otra parte los líquidos con tiempos característicos bajos pueden comportarse como sólidos elásticos durante un proceso de deformación muy rápido.

A pesar de las ventajas que presenta clasificar a los materiales según su comportamiento, puede ser de gran ayuda tratar de definir precisamente un material sólido y un material líquido. Por lo general se definen de la siguiente manera:

Sólido:

Los sólidos son capaces de mantener una forma definida y hasta cierto punto son materiales que no cambian su forma de manera constante cuando se someten a un determinado esfuerzo o fuerza. Para un esfuerzo o fuerza dados existe una deformación final, la cual puede o no ser alcanzada instantáneamente.

Líquido:

Los líquidos no son capaces de soportar un esfuerzo de cizallamiento, son materiales que cambian su forma continuamente (fluyen) cuando se someten a una fuerza dada, sin importar que tan pequeño sea el esfuerzo.

Para describir el comportamiento de los materiales que cae entre las categorías de los comportamientos típicos de los sólidos elásticos y los fluidos newtonianos viscosos se utiliza el término "viscoelasticidad". En el caso de los sólidos se habla de un sólido viscoelástico, sin embargo el caso de los líquidos es más ambiguo, se habla de líquidos viscoelásticos, líquidos elástico-viscosos y líquidos elásticos.³⁹

5.2. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS ALIMENTOS SÓLIDOS

5.2.1. DETERMINACIONES EN ALIMENTOS SÓLIDOS

5.2.1.1. MÉTODOS FUNDAMENTALES

Estos son los métodos de medición clásicos que se utilizan para deformar muestras de forma definida, dándose a conocer parámetros reológicos fundamentales como la elasticidad o la incompresibilidad en

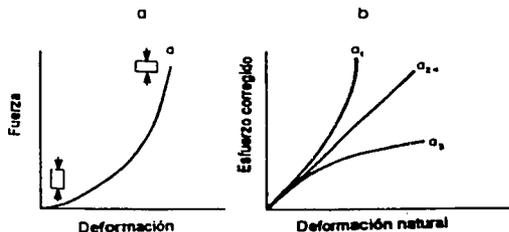
³⁹ Barnes, H.A. et al., Rheology Series 3: an Introduction to Rheology

términos de kilogramos, metros y segundos, por lo que se sabe exactamente qué es lo que se está midiendo. Estos métodos pretenden relacionar la naturaleza del producto en cuestión con modelos reológicos básicos. Mediante estos métodos es posible determinar una o varias constantes físicas en términos de parámetros bien definidos. Debido a que los alimentos son sistemas reológicamente complejos, en la mayoría de los casos el análisis fundamental puede resultar demasiado laborioso. No se obtienen resultados fácilmente interpretables, además de que se mide una sola propiedad de la muestra, por lo que los resultados obtenidos a través de estos métodos no se correlacionan fácilmente con la evaluación sensorial ni con los métodos empíricos.^{40, 41, 42}

DEFORMACIÓN UNIAXIAL Y RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN

DETERMINACIONES DE COMPRESIÓN

En la mayoría de las determinaciones uniaxiales de compresión, la muestra de alimento, generalmente cilíndrica, se somete a una deformación a un grado constante. La fuerza que se genera se registra continuamente y la relación entre fuerza y tiempo (o deformación absoluta) tiene la forma que se presenta en la ilustración. Esta gráfica cóncava debe su forma al incremento del área transversal y a la no-linealidad de la deformación y proporciona realmente poca información con respecto al carácter reológico del alimento, por lo tanto es necesario transformar este tipo de gráficas en gráficas "reales", que relacionan esfuerzo-deformación.



⁴⁰ <http://osu.orst.edu/food-resource/texture/index.html>

⁴¹ Villamil, R.M., Aproximación a la Reología. Teoría, Aspectos Prácticos e Investigación en Alimentos

⁴² Bourne, M.C., Converting from Empirical to Rheological Test on Foods – It's a Matter of time

Estas curvas proporcionan información adicional.

- La curva cóncava hacia arriba indica que el material es altamente compresible, como el pan.
- La curva cóncava hacia abajo corresponde a un material predominantemente rendidor que sufre una desintegración estructural bastante considerable, como resultado de la deformación.
- Una relación lineal puede interpretarse de dos maneras:
 1. Que el material en cuestión es muy elástico
 2. Que ocurrió una destrucción estructural y el rendimiento se compensó mediante la compactación de los residuos de la estructura colapsada.

DETERMINACIONES DE TENSIÓN

En el caso de la tensión la situación es inversa con respecto a la pendiente de la curva fuerza-deformación, primeramente debido a que el área transversal de la muestra disminuye con la deformación. En las coordenadas reales la interpretación es similar, sin embargo, el endurecimiento debido a la deformación sustituye a la compresibilidad o a la compactación en el sentido de un aumento en la fuerza.

COEFICIENTE DE DEFORMABILIDAD

La pendiente de una relación verdadera esfuerzo-deformación es un buen parámetro para la cuantificación de la rigidez de un material. Si se trata de un material elástico y su deformación es pequeña, las curvas aparente y verdadera serán líneas rectas para todos los propósitos prácticos. En estos casos la determinación del coeficiente de Young (esfuerzo/deformación = $[F/A]/[\Delta L/L]$), como la pendiente de la relación esfuerzo-deformación es sencilla. Por el contrario, en el caso de la mayoría de los alimentos la relación esfuerzo-deformación es frecuentemente curva y es además una función de factores tales como el tamaño de la muestra y el grado de deformación. Bajo tales circunstancias es preferible considerar la relación esfuerzo-deformación como un "coeficiente de deformación" y tratar su magnitud no como una propiedad material absoluta sino como una propiedad relativa, hasta

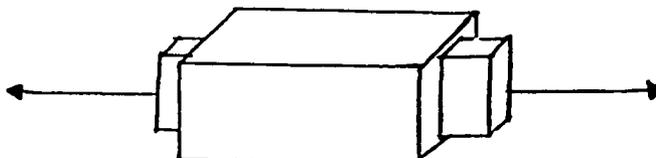
cierto punto arbitrariamente determinada, cuya utilidad está limitada a las condiciones particulares bajo las cuales se ha determinado.⁴³

DETERMINACIONES DE COMPRESIÓN O EXTENSIÓN AXIAL

En estas determinaciones se mide la deformación transversal y longitudinal en muestras cilíndricas que se someten a compresión o tensión axial, es decir, la relación de Poisson, que se expresa como el cambio en la extensión transversal dividido entre el cambio en la longitud resultante. Dentro de un sistema de coordenadas tridimensional, es esfuerzo de tensión en la dirección x provoca esfuerzo de compresión en las direcciones y y z (el objeto se hace más largo y delgado)

$$\nu = -\epsilon_y / \epsilon_x$$

=esfuerzo transversal / esfuerzo longitudinal



44

DETERMINACIONES DE COMPRESIÓN-DESCOMPRESIÓN

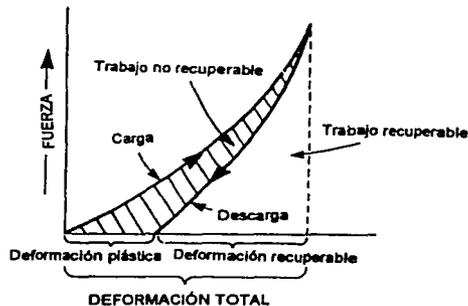
Si se somete a un cuerpo elástico ideal a un ciclo de compresión-descompresión, éste siempre regresará a su forma original, y toda la energía invertida en el proceso de deformación se recuperará. Mientras que en la mayoría de los materiales elásticos no ideales siempre se perderá algo de energía debido a la fricción interna del material. Sin embargo, el cuerpo recuperará su forma original y tendrá las mismas propiedades o muy similares a las originales.

La mayoría de los alimentos sólidos no es idealmente elástica, una parte de la deformación es permanente aún después de la descompresión. En estos materiales una gran parte de la energía

⁴³ Moskowitz, Howard, Food Texture Instrumental and Sensory Measurements

⁴⁴ www.ee.washington.edu/class/539/Lectures/lecture7/sld007htm

invertida en la deformación es irrecuperable debido a la fricción interna y a las modificaciones irreversibles de la estructura del alimento. El grado de elasticidad es el cociente de la deformación recuperable y la deformación total. De manera similar, el cociente del trabajo recuperable y el irrecuperable puede ser característico de cada material. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos parámetros pueden depender fuertemente del nivel final de deformación y de otros factores. En estos casos, la dependencia de estos parámetros hacia las condiciones de prueba puede ser considerada como huella digital reológica del material y se puede interpretar en términos de desintegración estructural continua o aparición de presión hidrostática.



EFFECTO DEL GRADO DE DEFORMACIÓN

La mayoría de los alimentos sólidos son materiales viscoelásticos, lo cual significa que su comportamiento no es completamente elástico ni viscoso, pero que comparte las propiedades de ambos comportamientos. Una de las características típicas de los materiales viscoelásticos es que el esfuerzo o la fuerza que desarrollan no es solamente una función de la deformación, sino también del grado en el cual ésta ha sido aplicada. Por lo general, a mayor velocidad, mayor será el esfuerzo, sin embargo existe un límite teórico, ya que a niveles demasiado elevados el material se comportará como un cuerpo elástico.

EFFECTO DE LAS DIMENSIONES DEL CUERPO

Teóricamente, en la determinación perfecta de un material ideal la relación esfuerzo-deformación en la deformación uniaxial debe ser independiente de las dimensiones de la muestra. Sin embargo en varias ocasiones, especialmente en determinaciones de compresión con muestras planas, esto no se cumple debido a las siguientes razones:

1. Existen fuerzas de fricción entre las superficies de contacto, y por lo tanto la muestra presenta una fuerza considerablemente mayor y un patrón de deformación diferente.
2. En el caso de tejidos vegetales y animales, que son estructuras que contienen fluidos, el nivel de esfuerzo o tensión en una muestra deformada se puede deber a la presión hidrostática que se genera. El grado de disipación de la presión depende de la densidad del fluido, de la porosidad y de la microestructura de la muestra para que éste salga a través de la estructura celular.

Teóricamente, los efectos dimensionales de la muestra están relacionados con los efectos del grado de deformación de la misma. Esto se debe a que a un cierto grado de deformación constante un cuerpo pequeño se deforma a un mayor grado de deformación real.

DETERMINACIONES DE DEFORMACIÓN TRIAXIAL

En este tipo de análisis, los cuerpos se someten a presión hidrostática aplicada a través de un fluido incompresible, y se registra el cambio del volumen en los cuerpos. En este caso, la fuente de información reológica es la relación entre la deformación volumétrica adimensional (porcentaje del cambio de volumen) y la presión aplicada (unidades de tensión, fuerza o esfuerzo). El coeficiente de volumen es el cociente entre esfuerzo y deformación volumétrica. Este coeficiente de volumen, al igual que el coeficiente de deformabilidad, es dependiente del tiempo y del grado de deformación. La información que se obtiene de estas pruebas no es la misma que la que se obtiene del análisis uniaxial o de cizallamiento. El coeficiente de volumen está relacionado con los coeficientes de deformabilidad y cizallamiento.



DETERMINACIONES DE TORSIÓN

En estas pruebas se producen los tres tipos de esfuerzo (cizallamiento, compresión y tensión). Por razones geométricas y técnicas, la torsión es un método adecuado para la medición directa del esfuerzo de cizallamiento para el cálculo del módulo de cizallamiento (cociente entre esfuerzo de cizallamiento y deformación). La información pertinente se deriva de la torsión, del ángulo de torsión y de las dimensiones del cuerpo.

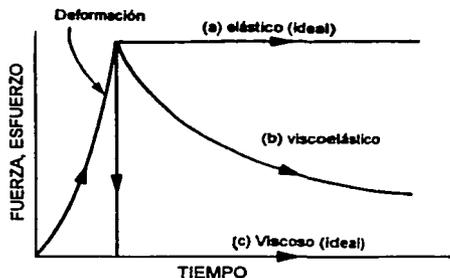
DETERMINACIONES DE RELAJACIÓN DE ESFUERZO O FUERZA

Este tipo de determinación se lleva a cabo mediante una deformación de la muestra, seguida por el registro de la caída de la fuerza con respecto al tiempo. La curva de relajación "cruda" es una gráfica de fuerza contra tiempo, generalmente se representa en forma normalizada como una curva de esfuerzo o módulo de decaimiento. El módulo de decaimiento se obtiene dividiendo la magnitud momentánea de la fuerza de decaimiento entre el área del cuerpo y entre la deformación correspondiente a la deformación fija. La prueba se puede repetir a distintos niveles de deformación cambiando el grado de deformación cuando se alcanza la deformación planeada.

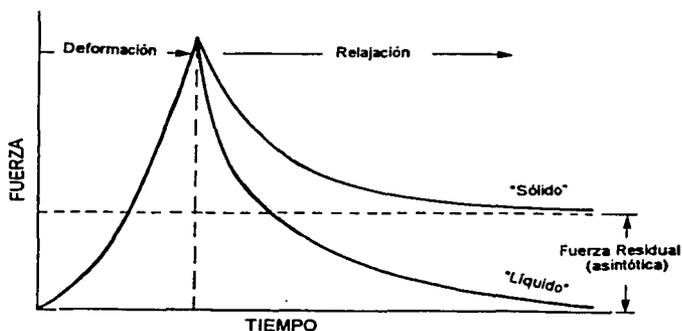
Un cuerpo elástico ideal no se relaja del todo y la energía invertida en su deformación se transforma en energía almacenada, que será liberada cuando el cuerpo regrese a su estado original. Por el contrario, un cuerpo viscoso ideal no puede mantener ningún tipo de esfuerzo sin encontrarse en movimiento, y por lo tanto se relaja instantáneamente (esto se puede observar cuando se agita el agua).

En los materiales viscoelásticos el comportamiento es intermedio, la fuerza se relaja, pero no a un grado constante. Este fenómeno de de

relajación mecánica es el resultado de una reordenación molecular y estructural, que en el caso de productos heterogéneos y de tejidos celulares puede ser consecuencia del flujo de líquidos. Sin importar el mecanismo mediante el cual se relaja el esfuerzo, se puede asumir que el esfuerzo dado por cualquier tensión (o la fuerza dada por una deformación) tiene uno o dos tipos de componentes.



El primero es un esfuerzo elástico que solamente es proporcional a la deformación. El segundo es un esfuerzo dependiente del grado. Por lo tanto, durante un periodo de tiempo suficientemente largo, todo el esfuerzo del segundo tipo se disipará y el esfuerzo remanente será únicamente del primer tipo. Consecuentemente, una curva esfuerzo-deformación se puede ampliar mediante una prueba de relajación y el grado de solidez se puede determinar a partir del esfuerzo que permanece aún después de un largo periodo de tiempo. Sin embargo, en un sólido elástico ideal el 100% del esfuerzo permanece sin relajarse, mientras que en los líquidos todo el esfuerzo se relaja. Lo anterior puede ilustrar como las diferencias en el comportamiento reológico no se determinan en "tipo", si no que en "grado".



El problema principal al establecer el grado de solidez de la mayoría de los alimentos es que después de un periodo de tiempo suficientemente largo éstos se ven afectados por actividad microbiológica, enzimática o por pérdidas de humedad. Por lo tanto, la fuerza medida después de un periodo largo es de poca relevancia con respecto a las propiedades reológicas originales. Sin embargo, este problema se puede solucionar hasta cierto punto estableciendo un tiempo arbitrario para la duración de la prueba.

DETERMINACIONES DEL TIEMPO DE RELAJACIÓN

El tiempo de relajación se define como el tiempo en el cual la fuerza o el esfuerzo tienen una magnitud de aproximadamente el 37% de la inicial. Este parámetro es una medida cruda del grado de decaimiento del esfuerzo y puede ser útil para comparaciones entre distintos materiales. Una manera más precisa de describir la curva de relajación es mediante un espectro de tiempo de relajación, el cual puede ser discreto o continuo. Para la mayoría de los alimentos, la forma completa de una curva de relajación se puede describir en términos de una ecuación de dos variables, evitándose la complejidad matemática que está asociada a las ecuaciones que involucran a más de un tiempo de relajación.

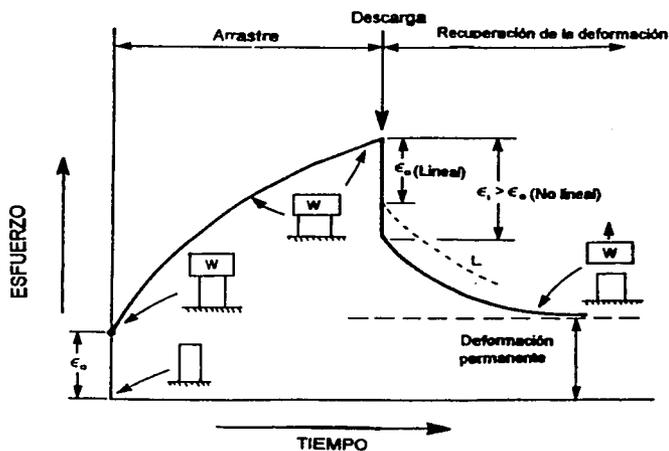
DETERMINACIONES DE ARRASTRE O FLEXIBILIDAD

Idealmente, las determinaciones de arrastre se llevan a cabo añadiendo peso a la muestra poco a poco (ya sea en determinaciones de

compresión el esfuerzo real disminuye debido a que se incrementa el área transversal. Existen métodos para compensar estos efectos, pero si las cargas son pequeñas o los cambios dimensionales son despreciables no es necesario hacer corrección alguna.

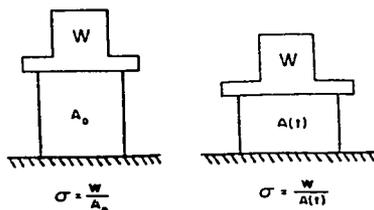
En muchas ocasiones la prueba de arrastre se complementa mediante una prueba de recuperación, en la cual se retira la carga y se registra la recuperación de la muestra.

A continuación se presenta una típica curva típica de arrastre. Los datos se registran en términos de una deformación con respecto al tiempo. Generalmente, estos datos se transforman para dar una curva de esfuerzo con respecto al tiempo o de esfuerzo por unidad de tensión con respecto al tiempo. Al segundo parámetro (esfuerzo por unidad de tensión) se le conoce como deformación instantánea y se expresa en unidades recíprocas a las de la tensión. La forma de estas gráficas se es la misma sin importar que los parámetros de arrastre estén dados en términos de deformación, deformación instantánea o esfuerzo, siempre y cuando las dimensiones de la muestra no se tomen en consideración en el cálculo de la magnitud de la deformación instantánea.



En este tipo de pruebas se obtienen tres comportamientos distintos:

- En la mayoría de las pruebas de arrastre se causa una deformación instantánea (en Inglés conocido también como compliance) que disminuye gradualmente. En algunos casos, particularmente en pruebas de compresión, la deformación llega a un estado de equilibrio, lo cual es un indicador de que el material es de naturaleza sólida. La magnitud de esta deformación o deformación instantánea de equilibrio depende del cambio del área transversal de la muestra. Como consecuencia, un material que presenta deformación instantánea elevada en tensión, es realmente más rígido de lo que indica la deformación instantánea de arrastre. En el caso de compresión, la situación es inversa, ya que el área transversal se incrementa con respecto a la deformación instantánea.



- En el caso de los líquidos, lo ideal es que la muestra continúe su flujo indefinidamente y que llegue a un estado, constante de deformación en vez de un equilibrio de deformación. Sin embargo, cabe mencionar que si la carga aplicada es suficientemente grande, un sólido verdadero en tensión puede presentar un comportamiento de arrastre similar. La razón de lo anterior es que al disminuirse el área transversal surge un incremento en el esfuerzo real que sufre la muestra.

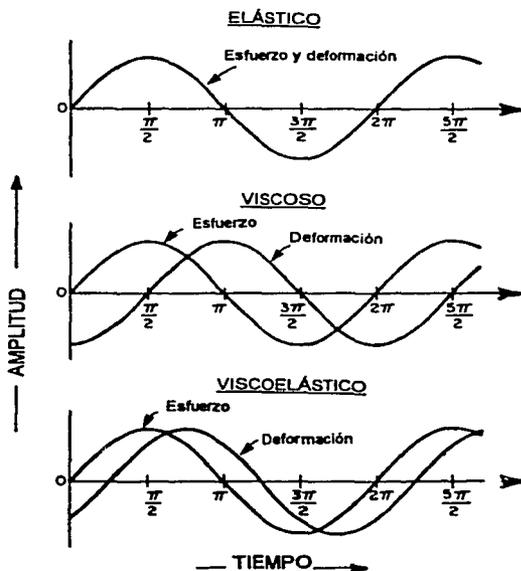
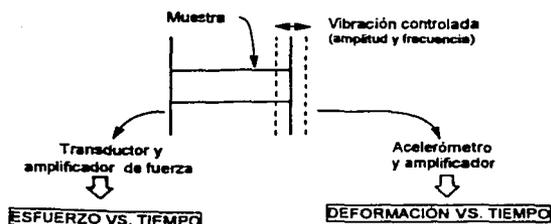
- Cuando la carga es suficientemente elevada se llega a causar una falla retardada. Este es un hecho inevitable en las pruebas de arrastre con líquidos, y la falla de tales materiales en tensión sólo es cuestión de tiempo. En sólidos verdaderos, la falla puede no ocurrir del todo bajo cargas pequeñas, pero ocurre cuando de una u otra manera se incrementa la carga.

DETERMINACIONES DINÁMICAS

En las determinaciones dinámicas la muestra, que puede ser una unidad intacta como una fruta entera, se somete a una deformación sinusoidal. Las variables experimentales controlables son la amplitud y la frecuencia de la deformación impuesta. Debido a que en materiales viscoelásticos el esfuerzo y la deformación no siguen la misma curva, (cruzan el eje en distinto punto pero son sinusoidales las dos) la fase de retraso entre ambos puede ser un indicador de las características reológicas del material en cuestión. En un sólido elástico ideal no se presenta este desfaseamiento entre esfuerzo y deformación, mientras que el ángulo de fase de un fluido newtoniano sea de 90° . La dependencia del tipo de curva con respecto a la frecuencia puede verse como una huella digital reológica de la muestra en cuestión.

El módulo que se presenta a cierta frecuencia de resonancia puede proporcionar información relacionada con la rigidez de la muestra. Este método se utiliza para el monitoreo de las características texturales en la maduración de plátanos, manzanas y papas. Las deformaciones causadas por pruebas dinámicas son insignificantes, y por lo tanto este tipo de prueba se considera no destructiva.⁴⁵

⁴⁵ Moskowitz, Howard, Food Texture Instrumental and Sensory Measurements



DETERMINACIONES ESPECTRALES ULTRASÓNICAS

El análisis espectral ultrasónico revela una variedad de características en materiales biológicos; primeramente se envía un amplio rango de frecuencias a la muestra y el análisis espectral indica qué frecuencias son las más afectadas por las partes no-homogéneas de la muestra, tales como la cantidad de tejido conectivo o la tereza de las fibras (en el caso de la carne).

Debido a que el espectro ultrasónico se ve afectado por la elasticidad y densidad del tejido muscular, se puede predecir la ternera mediante la medición de parámetros espectrales.⁴⁶

DETERMINACIONES ACÚSTICAS

Estas determinaciones se llevan a cabo sometiendo la muestra a una compresión y registrando las emisiones acústicas en un disco compacto. Los registros se comprimen después de filtrar los ruidos de fondo. Las "firmas" acústicas se caracterizan por las dimensiones de sus espectros.^{47, 48}

Este tipo de determinaciones es útil en alimentos crujientes, ya que en éstos las características texturales se encuentran muy relacionado con las características de sonido.

DETERMINACIONES DE PROPIEDADES DE FLUJO DE POLVOS

El reómetro para polvos se diseñó especialmente para la determinación de propiedades de flujo de polvos, mezclas húmedas, gránulos y polvos húmedos. Este equipo es exacto y fácil de utilizar, además acondiciona la muestra del polvo para que se puedan llevar a cabo las repeticiones necesarias con la misma. El principio de operación de este equipo es simple; una cuchilla rotatoria similar a la hélice de un barco gira dentro de la muestra de polvo. Mediante la medición de la fuerza, torsión y el perfil de energía necesario para hacer girar la hélice dentro de la muestra, el reómetro proporciona información precisa de las propiedades de flujo de la muestra.⁴⁹

⁴⁶ Park, B et al., Ultrasound Spectral Analysis for Beef Sensory Attributes

⁴⁷ Brochetti, D y Penfield, M.P., Speech Analysis Techniques: a Potential Model for the Study of Mastication Sounds

⁴⁸ Tesch, R. et al., Comparison of the Acoustic and Mechanical Signatures of Two Crunchy Cereal Foods at Various Water Activity Levels

⁴⁹ www.stablemicrosystems.com/press.htm

FUERZA Y RUPTURA

RUPTURA Y CONDICIONES DE PROPAGACIÓN

En términos mecánicos, la resistencia que tienen los materiales ante la ruptura se expresa en unidades de esfuerzo, y se determina en el punto de fractura. Debido a que existen tres tipos de esfuerzo, cualquier tipo de material puede tener su tipo de fuerza correspondiente a la resistencia que presenta ante la ruptura en tensión, compresión o cizallamiento. Las magnitudes absoluta y relativa de cada tipo de resistencia dependen de factores estructurales y composicionales de la muestra. Es común encontrar materiales con gran resistencia a un tipo de esfuerzo y muy poca resistencia con respecto a otro tipo de esfuerzo.

En las determinaciones de deformación, se desarrollan distintos esfuerzos a lo largo de los planos en distintas direcciones. Un ejemplo claro es el desarrollo de fuerzas de cizallamiento como resultado de una deformación uniaxial. Si estos esfuerzos superan a la fuerza de cizallamiento, el material podrá "fallar" con respecto a cizallamiento, a pesar de que solamente se someta a compresión. Esta situación se puede presentar al comprimir frutas inmaduras. En estos casos los esfuerzos de cizallamiento se desarrollan en la muestra comprimida que sufrió una deformación considerable.

Si en compresiones uniaxiales se genera una fricción considerable entre el área de contacto de la muestra y el equipo de laboratorio, la muestra se deformará. En estos casos la muestra se puede fracturar parcialmente en la región deformada debido a la generación de un esfuerzo. Aunque en los alimentos aún no se ha definido claramente, no se puede excluir la posibilidad de que la ruptura se causa cuando se sobrepasa un cierto nivel de deformación, más que de esfuerzo o de fuerza. Este tipo de criterio se puede asociar con la fractura de alimentos crujientes.

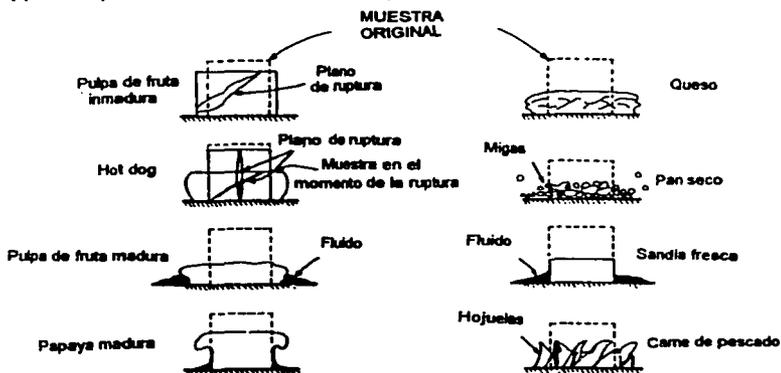
Dentro de una muestra los esfuerzos no están distribuidos uniformemente, ya sea por factores geométricos o de irregularidad estructural. Dentro de la muestra existen puntos en los que las condiciones locales o la concentración de esfuerzo son típicamente distintos y éstos proporcionan un rendimiento exclusivo de esa región. Algunos de estos puntos típicos son fallas estructurales, grietas y/o dislocaciones dentro de un cristal u otros componentes. Las fracturas

que se inician debido a estas fallas se propagan y pueden promover la fractura en otros puntos débiles.

PATRONES DE RUPTURA

Debido a que los alimentos se pueden considerar estructuras de múltiples componentes, más que materiales homogéneos, la propagación del patrón de ruptura puede variar mucho. La típica fractura causada por cizallamiento, caracterizada por una propagación instantánea y un único plano de fractura, puede encontrarse principalmente en alimentos relativamente homogéneos como la pulpa de fruta inmadura y emulsiones cárnicas. En el caso de los materiales relativamente uniformes como algunos quesos, la fractura se caracteriza por una gran cantidad de planos de fractura. Si el material tiene muchos componentes estructurales visiblemente diferentes, como las hojuelas o fibras, la muestra se desintegrará dejando muchos de sus componentes intactos, ejemplos típicos son la carne, el pescado y las frutas fibrosas. Cuando el material es muy quebradizo y duro, como el pan seco, las partículas y agregados pueden salir disparados de la muestra a gran velocidad y los residuos de la muestra serán de distintos tamaños.

En otros materiales, se presentan patrones muy específicos como el de la papaya madura que produce una forma tipo hongo. En tejidos vegetales y de origen animal, la ruptura viene acompañada de una gran liberación de líquido. También existen alimentos que se deforman o fluyen constantemente sin presentar ningún estado de fractura abrupta de manera clara dentro de un gran rango de niveles de deformación. (quesos procesados o malvaviscos).



El patrón de fractura, al igual que las condiciones de deformación y esfuerzo bajo las cuales ocurre o no ocurre la fractura, son las características texturales del material y son un reflejo directo de los factores estructurales y los mecanismos de deformación del mismo. Las condiciones de experimentación pueden volverse factores de influencia, especialmente en el esfuerzo de fractura y en un menor grado, en la deformación, debido a que la deformación que ocurre hasta el momento de la fractura es parte inherente del fenómeno de la fractura. A pesar de que el patrón de fractura es un factor típico para cada material en una determinación en particular, puede ser totalmente distinto en otro tipo de pruebas. De este modo, los quesos procesados pueden soportar una gran deformación de compresión, mientras que en tensión fallarán a causa de una deformación muy pequeña.

Se debe tener en cuenta que la fractura se reconoce como un fenómeno instantáneo de modo que su ocurrencia se puede identificar mediante un punto dentro de una gráfica que relaciona esfuerzo-deformación. Sin embargo existen varias indicaciones de que en muchos materiales de tipo alimenticio, el grueso de la fractura observada es la culminación de un proceso continuo de rendimiento.³⁰

5.2.1.2. MÉTODOS EMPÍRICOS

Mediante los métodos empíricos se miden parámetros que generalmente no están muy claramente definidos y los cuales, según la experiencia práctica, están muy relacionados con la calidad de la textura y con el análisis sensorial. En estas pruebas los alimentos se someten a una deformación mecánica, la cual involucra una secuencia o combinación de fuerzas de compresión, tensión, cortado, cizallamiento, punción, flujo o extrusión, registrándose finalmente la reacción de la muestra. Debido a que generalmente las condiciones de prueba son arbitrarias y a que se tienen muchos parámetros desconocidos, no es posible llevar a cabo un análisis teórico muy riguroso, y la única aproximación posible a éste es mediante un control muy estricto de cada parámetro experimental, sin embargo estos métodos son adecuados para el control de calidad. Estas determinaciones solamente se pueden considerar como un elemento comparativo dentro de un conjunto de condiciones bien definidas. El efecto de variables tales como los grados

³⁰ Moskowitz, Howard, Food Texture Instrumental and Sensory Measurements

de deformación o el tamaño de la muestra se pueden establecer experimentalmente para llevar a cabo comparaciones bajo condiciones no-estándares. Son métodos prácticos y poco costosos.^{51, 52, 53}

DETERMINACIONES DE PUNCIÓN O PUNZONADO: PENETRÓMETROS

Los dispositivos que se utilizan en este tipo de determinaciones son los penetrómetros: se lleva a cabo una penetración abrupta de la muestra y se determina la fuerza requerida para la introducción del punzón a una profundidad definida o se determina la profundidad de la penetración a una fuerza dada. A mayor fuerza obtenida en la lectura (o menor profundidad de penetración), más resistente será el material analizado. Esto se toma como una medida de firmeza o resistencia.⁵⁴

TEXTURÓMETRO DE MAGNESS TAYLOR

Este dispositivo mide la fuerza máxima necesaria para presionar un aro de metal con un diámetro de 5/16" al interior de una fruta. Este instrumento se utilizaba para determinar la madurez en los frutos.⁵⁵

Se han realizado muchos estudios con respecto al desempeño de estos dispositivos y se ha demostrado que existe un efecto del operador el cual depende del producto a analizar, por ejemplo la fuerza de penetración en manzanas se incrementa rápidamente con poca penetración, hasta que la pulpa de la manzana cede y entonces comienza la penetración. Esto implica que la profundidad de penetración debe ser pequeña para medir el punto de rendimiento de una manera consistente, sin embargo la velocidad de penetración no causa grandes diferencias.

De esta prueba se pueden obtener dos lecturas no relacionadas, la deformación debida a las propiedades elásticas y una medida del punto de rendimiento de la ruptura del tejido de la manzana. En caso de que se estudien las mismas características, las lecturas del dispositivo de

⁵¹ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

⁵² <http://osu.orst.edu/food-resource/texture/index.html>

⁵³ Bourne, M.C., Converting from Empirical to Rheological Test on Foods – It's a Matter of time

⁵⁴ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

⁵⁵ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

Magness Taylor (manual) y del Instron (grado constante de penetración) son casi perfectamente correlacionables, por lo tanto, se ha concluido que este dispositivo, si se utiliza correctamente, proporciona los mismos resultados que un instrumento mecanizado.

TEXTURÓMETRO DE CRISTEL

El texturómetro de Christel cuenta con una probeta de 25 punzones con un diámetro aproximado de 3/16". La muestra se coloca dentro de un contenedor hacia el cual se presiona el montaje con los punzones.

MADURÓMETRO DE LYNCH-MITCHELL

El madurómetro cuenta 143 probetas con un diámetro de 1/8". Cada probeta punza un chícharo, que es colocado dentro de un recipiente con hoyos de diámetro de 3/16", los cuales se encuentran exactamente abajo del dispositivo con los punzones. La fuerza de penetración resultante de la lectura proporciona un valor global para el conjunto de todos los chícharos.⁵⁶

El texturómetro y el madurómetro se diseñaron para llevar a cabo determinaciones con guisantes, pero ambos también se han utilizado para medir la ternura en la carne. La diferencia es que el tamaño de la muestra se selecciona numéricamente para el madurómetro y por volumen para el texturómetro.

GELÓMETRO DE BLOOM

Este dispositivo mecánico se utiliza para medir la rigidez en diversos geles y gelatinas. La rigidez se determina mediante la penetración de un balín de plomo, guiado por una probeta, se penetra al interior de la muestra hasta una profundidad determinada. En el momento en que se llega a esta profundidad determinada se detiene la penetración mediante un interruptor.⁵⁷

⁵⁶ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

⁵⁷ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

TEXTURÓMETRO DE STEVEN⁶

Este dispositivo se diseñó para llevar a cabo la prueba estándar del Gelómetro de Bloom, junto con otras determinaciones. La probeta estándar de este equipo es plana y circular, y además cuenta con probetas en forma de esfera, aguja o cuchilla. El impacto máximo es de 15 cm y la distancia de penetración es ajustable. La probeta baja hacia la muestra a una velocidad máxima hasta que se alcanzan los 5 g de fuerza, en ese momento sigue bajando a la velocidad elegida hasta la profundidad determinada. La fuerza que se genera se registra en un lector digital.⁵⁸

PENETRÓMETRO ASTM PARA GRASA

La probeta de este penetrómetro tiene la forma de cono y también se basa en la profundidad de la penetración de la probeta. Se mide la firmeza de materiales untuosos en términos de la profundidad a la cual se hunde la probeta con forma de cono metálico de tamaño y forma estándares en una superficie de muestra bajo condiciones definidas.

ANALIZADOR DE GELES COLOIDALES MARINOS

Este equipo se diseñó para medir la fuerza de geles de carrageninas y otros extractos marinos purificados. La probeta baja conducida por un motor a una velocidad de 18cm/min y se registra la fuerza máxima en una escala de Chantillon. Un segundo modelo cuenta con una celda electrónica conectada a un registrador y se obtienen datos de fuerza-deformación.

Se puede utilizar una cuchilla de Cherry Burell como accesorio adicional y de este modo el equipo es idéntico al Tensiómetro de Cherry Burell.

Este dispositivo se utiliza para la medición de firmeza en alimentos suaves mediante punción.

⁵⁸ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

RIDGELÍMETRO

Este equipo se desarrolló para medir la rigidez de geles elaborados a partir de pectinas. Primeramente se prepara el gel según el procedimiento estándar, se saca del molde y se coloca en el ridgelímetro. La probeta se mueve hacia la superficie de la gelatina y exactamente después de 2 minutos se pone en contacto con la gelatina. La escala proporciona el porcentaje de hundimiento.⁵⁹

COMPRESÍMETROS

Como su nombre lo indica, estos instrumentos miden la resistencia de los alimentos a la compresión. De manera similar a las pruebas de penetración, en estas pruebas se determina la fuerza necesaria para causar una deformación o la deformación causada por una fuerza determinada. Los compresímetros se diferencian de los penetrómetros en que el material de prueba no se penetra ni se pincha, y generalmente no se sobrepasa el punto de rendimiento, por lo tanto, la celda debe consistir únicamente de dos superficies lisas paralelas, una fija y la otra móvil. Cualquier tipo de celda que no sea la anteriormente descrita involucra factores de tensión o de penetración o cortado.

COMPRESÍMETRO DE BAKER

Este método consta de un émbolo plano que presiona suave y uniformemente una rebanada de pan mediante la rotación de un pequeño tambor. La fuerza que actúa sobre el émbolo y la cantidad de compresión se pueden leer de dos escalas.⁶⁰

COMPRESÍMETRO DE CAFFYN Y BARON

Este compresímetro utiliza una probeta hemiesférica y se utiliza para medir la firmeza de grandes bolas de queso. Se aplica una carga a la probeta reposando sobre la muestra mediante una serie de brazos apalancados y se mide la deformación del queso antes y después de retirar la carga. La primera lectura denota la firmeza de la muestra, mientras que la diferencia entre ambas lecturas se toma como una medida de recuperación elástica.

⁵⁹ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

⁶⁰ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

COMPRESÍMETRO PARA CEBOLLAS DE ANG

Este dispositivo se diseñó para medir la firmeza de cebollas, es decir, de muestras curvas. Se utiliza un émbolo cuadrado que comprime la superficie redonda de la muestra, adaptado a la prensa de cizallamiento de Kramer. Voisey y Hunt midieron la resistencia a la ruptura de cascarones de huevo de la misma manera.

FIRMÓMETRO

Este compresímetro se utiliza exclusivamente para medir la firmeza de tomates. La fruta se comprime en torno a todo su perímetro mediante una cadena conectada a un dispositivo de poleas y peso.

DETERMINACIONES DE CIZALLAMIENTO O CORTE

En este tipo de determinación se mide la fuerza de cizallamiento como un índice de textura.

DISPOSITIVOS CON UNA SOLA CUCHILLA

CIZALLADORA DE WARNER-BRATZLER

Este dispositivo está compuesto por una navaja metálica, cuyos bordes afilados se encuentran en la parte interior de un triángulo perforado en una placa de acero, de forma que la muestra cilíndrica de alimento se introduce dentro de la perforación triangular y se desplaza hacia un lado para llevar a cabo el cizallamiento. El desplazamiento del alimento se lleva a cabo mediante dos palancas que lo sujetan y que están colocadas a un dinamómetro que registra la fuerza. Los resultados obtenidos por este tipo de determinación son muy afectados por pequeñas variaciones en el diámetro de la muestra.

FIBRÓMETRO PARA ESPÁRRAGOS

Este instrumento fue diseñado para la Asociación Nacional de Enlatadores de los Estados Unidos. Consta de un soporte de forma parabólica con pequeñas ranuras verticales a través de las cuales pasa un alambre cortador para presionar en ángulo recto a los espárragos. La longitud de los espárragos que se puede cortar con 3 libras de presión de

los alambres se toma como medida de fibrosidad. A menor longitud, mayor es la resistencia y la fibrosidad de la muestra.⁶¹

TENSIÓMETRO DE CHERRY BURRELL

Este dispositivo se utiliza en la industria láctea para la determinación de la tensión de la cuajada de la leche. Una cuchilla circular corta la cuajada a una velocidad constante de 1plg/7.5s. La fuerza máxima se utiliza como un indicador de la tensión de la cuajada.⁶²

TENDERÓMETRO DE CUCHILLO ROTATORIO

Este tenderómetro para carne utiliza un cuchillo mecánico en forma de copa, el cual gira a velocidad constante a un número predeterminado de revoluciones por prueba. La profundidad de la cortada o el área total de la superficie de cortado deben ser proporcionales a la ternura de la muestra.

Estos equipos están sujetos a errores debido a variaciones en el filo del cuchillo y a la velocidad en que se aplica la fuerza.

DISPOSITIVOS CON VARIAS CUCHILLAS

TENDERÓMETRO FMC PARA CHÍCHAROS

Este dispositivo se desarrolló para medir la calidad y madurez de chícharos frescos. Una rejilla con 19 cuchillas gira a través de otra rejilla estacionaria. Los chícharos se colocan entre ambas cuchillas y se extruyen, sin embargo este pertenece a la categoría de equipos de cizallamiento.⁶³

TEXTURÓMETRO DE PABST

En este dispositivo cuenta con 8 cuchillas cortantes que se mueven horizontalmente. La celda es muy pequeña ya que el equipo está diseñado para contener piezas del tamaño de una mordida. Este aparato opera mediante un sistema de presión hidráulica y es un

⁶¹ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

⁶² DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

⁶³ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

dispositivo de auto-limpieza que se utiliza en aplicaciones de control de calidad. Este dispositivo permite la determinación de patrones de distribución, así como de resistencia promedio para el resto del material debido a que se pueden analizar chícharos, frijoles, corn flakes y otros productos de forma individual.

DETERMINACIONES DE EXTRUSIÓN

Por lo general en este tipo de determinaciones el alimento se coloca en un recipiente cilíndrico y es extruido mediante un émbolo de diámetro menor al del recipiente que al entrar en el mismo forma un ánulo. En estas determinaciones se mide la fuerza máxima, la fuerza promedio para la extrusión, el trabajo total aplicado, el peso del material extraído y el tiempo de extrusión.⁶⁴

Este tipo de determinaciones se lleva a cabo en cuatro etapas:

- Disminución de espacio disponible bajo el émbolo
- Compresión del alimento, deformándose el mismo
- Ruptura del alimento
- Flujo del alimento a través del ánulo.

DETERMINACIONES DE ADHESIVIDAD

En estas determinaciones se mide la adhesión de una muestra a una superficie. Se adhiere la muestra a una superficie lisa, como un disco, presionándola hacia la muestra, al retirarla de la muestra se obtiene la fuerza necesaria de separación, lo que es la adhesividad de la muestra.⁶⁵

DETERMINACIONES DE CARGA-EXTENSIÓN

EXTENSÍGRAFO DE BRABENDER

Este dispositivo se usa junto con el farinógrafo y funciona con el principio de carga-extensión, se utiliza para determinaciones de rutina y

⁶⁴ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

⁶⁵ Texture Technologies, Your Reference Manual for Texture Analysis

es un método estándar para la determinación de la calidad de la harina. El extensiógrafo consta de 3 partes:

- Amasadora.
- Gabinete de fermentación.
- Mecanismo que somete la masa a las grandes elongaciones.

El extensiógrafo somete a la muestra a grandes elongaciones, midiéndose la resistencia a la deformación, la extensibilidad y la energía necesaria para romper la masa.⁶⁶

EXTENSIÓMETRO DE INVESTIGACIÓN

El extensiómetro funciona de manera similar al extensiógrafo, sin embargo se trata de un equipo de tres unidades, ya que primeramente mide el contenido de agua requerido para la preparación de la masa bajo el principio de extrusión mediante un medidor especial que determina la absorción del agua, a continuación se tiene un mezclador y finalmente se lleva a cabo la determinación de extensión de la masa. Este equipo proporciona la misma información que el extensiómetro, ambos equipos también pertenecen a la categoría de los Instrumentos Imitativos.

DETERMINACIONES DE DOBLADO

ESTRUCTURÓGRAFO

La celda del estructurógrafo consta de un par de soportes separados a una distancia preseleccionada, sobre los cuales se coloca la muestra y se aplica fuerza en la parte central de la muestra. Este dispositivo se usa para determinaciones con alimentos quebradizos y puede utilizarse también para determinar la deformación por el doblado en alimentos no quebradizos.

5.2.1.3. INSTRUMENTOS IMITATIVOS

Estos mecanismos están diseñados para reproducir las condiciones a las cuales se somete el alimento en una operación

⁶⁶ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

humana específica tal como la mordida, el untado y el amasado. En estas pruebas se imita el movimiento y la deformación del alimento durante la evaluación humana, asumiendo que las fuerzas de reacción desarrolladas por la muestra se asemejan a las que se dan durante la evaluación humana. Las fuerzas involucradas que se aplican a los alimentos en este tipo de pruebas hacen que el análisis teórico sea muy difícil y tedioso.⁶⁷

MASTICÓMETROS

DISPOSITIVO DE MANDÍBULA DE CIZALLAMIENTO DE DASOW

Este dispositivo consta de un sistema hidráulico de movimiento apalancado y una plataforma de trabajo compuesta por una mandíbula cortadora multicapas móvil y una plataforma estacionaria con multrejillas. Este aparato se diseñó para trabajar con pescado y mariscos y no ha tenido otras aplicaciones.

Todos los dispositivos de cortado están sujetos a errores causados por diferencias en el filo de las cuchillas, alineación, urdimbre, etc. Aún no se han resuelto las dificultades para estandarizar la unidad entera, incluyendo la celda. Además existe la duda de qué es realmente lo que se está midiendo.

Se ha demostrado que se ponen en juego una gama de fuerzas, y se ha descubierto que la medición involucra fuerzas de cortado, compresión y extrusión y que pueden actuar diferentes combinaciones de estas fuerzas dependiendo de la naturaleza reológica del alimento en cuestión. Además el peso de la muestra también afecta de manera distinta en las determinaciones de cada tipo de alimento. En algunos casos el peso influye de manera lineal en la determinación de la fuerza, en otras se tiene una fuerza constante independientemente del peso y en otras una fuerza decreciente.

TENDERÓMETRO DE VOLODKEVICH

El tenderómetro de Volodkevich (1938) fue uno de los primeros intentos para medir las propiedades texturales de los alimentos bajo condiciones que se semejaran a las de la masticación. En este

⁶⁷ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

tenderómetro dos cuñas con las puntas redondeadas simulan la acción de los dientes; la cuña inferior está fija a un bastidor y la superior se mueve verticalmente mediante dos palancas, ejerciendo una acción de mordida y opresión sobre la muestra colocada entre ambas cuñas. El instrumento registra la fuerza de mordida como función de la deformación resultante y además puede proporcionar valores para la energía total utilizada en el proceso. Existen varias modificaciones de este dispositivo que se han utilizado para analizar carne.⁶⁸

PRUEBA DE FRACTURA MEDIANTE UNA CUÑA

El equipo básico que se utiliza para llevar a cabo esta prueba es el Instron, y la probeta consta de una cuña de ángulo de 10° a 30°. La probeta se fuerza hacia el interior la muestra, con lo cual se almacena energía en la misma. Únicamente en la fase inicial de la prueba la cuña corta a la muestra y en el punto de la penetración en el cual ya se ha almacenado suficiente energía en la muestra, la grieta se propaga por sí misma dentro del material. Una vez que comienza la propagación de la grieta la fuerza para continuar presionando la cuña al interior de la muestra cae de manera considerable.

Aparentemente, esta prueba es muy similar a la de Volodkevich, sin embargo éstas son muy distintas, ya que la prueba de Volodkevich es básicamente una prueba de compresión en la que la fuerza aumenta linealmente conforme se comprime la muestra. Por otra parte la prueba de fractura mediante una cuña es geoméricamente idéntica a una prueba de tensión y se lleva a cabo de modo que la mayor parte de la energía se disipa en la fractura dentro de una zona pequeña sin tratarse de una deformación plástica, por lo tanto no hay punto de comparación entre ambos métodos.⁶⁹

TENDERÓMETRO DENTAL MIT

El tenderómetro dental MIT, cuenta con una dentadura humana ajustada a un articulador conducido mediante un motor eléctrico. Esto proporciona movimientos mecánicos similares a los movimientos de la masticación dentro de la boca. La resistencia del alimento se detecta

⁶⁸ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

⁶⁹ Vincent, J.F.V. et al., The Wedge Fracture Test a New Method for Measurement of Food Texture

mediante un par de plumillas montado a la palanca que mueve la quijada superior. Se obtiene un registro continuo fotografiando las trazas en la faz del osciloscopio.⁷⁰

TEXTURÓMETRO DE GENERAL FOODS

El Texturómetro de General Foods se utiliza principalmente para el Perfil de Textura (TPA) Instrumental. Este equipo viene descrito más detalladamente en la sección de Equipos Universales o Multi-Propósito.

TEXTURÓMETRO BICÍCLICO B.I.T.E.

El texturómetro bicíclico (bi-cyclical instrument for texture evaluation; B.I.T.E. master) es un dispositivo que se instala en el Instron y lleva a cabo movimientos masticatorios tridimensionales. La celda de este equipo tiene una dentadura fija y cuenta además con un contenedor que imita a la lengua y la cavidad bucal.

DISPOSITIVOS DE EXTRUSIÓN

UNTADOR DE MANTEQUILLA

Esta prueba se basa en el principio de extrusión. Se extruye y cizallamiento un cubo de mantequilla mediante un extrusor de tornillo mediante el borde de un cuchillo a carga y velocidad estándares. La cantidad de cizallamiento requerida indica la untabilidad, pero tiene poca relación con los resultados organolépticos.⁷¹

5.2.1.4. MISCELÁNEOS

Los investigadores han creado una gran gama de instrumentos que en la mayoría de las ocasiones son aproximaciones intrigantes al comportamiento mecánico de los alimentos.

ALVEÓGRAFO DE CHOPIN

El alveógrafo se utiliza para la determinación de la fuerza del trigo y la harina mediante la medición del trabajo aplicado para formar una

⁷⁰ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

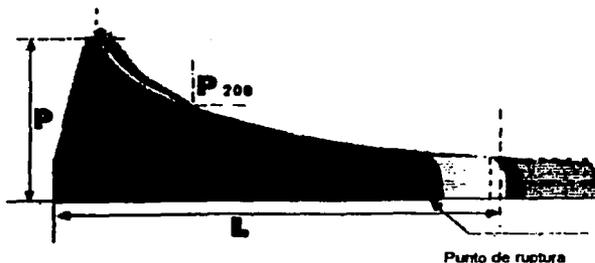
⁷¹ idem

burbuja de masa y reventaría, las curvas resultantes se correlacionan directamente con la acción del leudado en los alvéolos (pequeñas celdas de aire); es el método aprobado por la AACCC y es ampliamente utilizado por panaderos, molineros y productores. El alveógrafo consta de 3 partes:

- Un mezclador/extrusor para la preparación de una masa de harina con agua y sal.
- Una unidad infladora.
- Un manómetro que mide la presión que hace explotar la burbuja.^{72, 73}

Los parámetros que se registran son:

- Tenacidad (máxima presión de aire alcanzada)
- Longitud (extensibilidad, largo de la curva).
- Trabajo (W, fuerza de la harina, área bajo la curva)
- P/L constante de configuración de la curva.
- le: P200/P Elasticidad (P200 = Presión después de 200 ml de inflado, o 4cm del origen de la curva)



⁷² DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

⁷³ www.seedburo.com/chopin/product/alvco.htm

MADURÓGRAFO DE BRABENDER

Este madurógrafo mide los cambios en elasticidad de la masa durante la fermentación.

EXPANSIÓMETRO DE HALTON Y ZIMÓGRAFO DE CHOPIN

Ambos equipos tienen la misma función; un dispositivo que mide el incremento en el volumen de la masa a temperaturas entre los 30°C y los 100°C. Proporciona información respecto al comportamiento físico de la masa durante las primeras etapas del horneado.⁷⁴

ANALIZADOR DE CALIDAD DEL GLUTEN DE TRIGO

Este equipo se diseñó para la evaluación de las propiedades reológicas del gluten de trigo de harinas fuertes, medianas y débiles. El analizador de calidad del gluten de trigo (WGQA: Wheat gluten quality analyzer) es básicamente un dinamómetro que estira una tira de gluten hasta su punto de ruptura y determina la fuerza mediante un transductor. Existe una gran correlación entre los resultados obtenidos con el extensiógrafo de Brabender.⁷⁵

SUCULÓMETRO

Este dispositivo mide la jugosidad de los alimentos en forma del volumen de líquido exprimido por un peso conocido a una presión dada durante un tiempo determinado.

DESMENUZADOR DE ALIMENTOS

Este dispositivo se ha utilizado para medir la dureza de la carne en forma del trabajo requerido para moler una determinada cantidad de material a un determinado tamaño de partícula.

⁷⁴ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

⁷⁵ Chang, Y.K. y Ferrari, M.C., A New Apparatus for the Evaluation of Rheological Properties of Wheat Gluten

PULGAR MECÁNICO

A partir del primer diseño básico se desarrollaron diferentes variaciones. El pulgar mecánico pretende simular la acción del pulgar humano, presionando contra la fruta sin penetrarla. Este aparato consta de una probeta que se presiona al interior de la fruta a una distancia predeterminada hasta que se enciende un dispositivo luminoso, en ese momento se registra la fuerza requerida.

5.2.1.5. EQUIPOS UNIVERSALES O MULTI-PROPÓSITO

Como su nombre lo indica, las unidades multi-propósito o universales se utilizan para llevar a cabo una gran gama de pruebas de textura. Han adquirido gran popularidad en los últimos años debido a su versatilidad, flexibilidad, precisión y diseño.

Los más conocidos son el Instron, el Texturómetro de General Foods, la Prensa de Textura, el Sistema de Medición de Textura de Ottawa y el Texturómetro de Stable Micro Systems.

La popularidad de estos equipos se debe a que en esencia todos los dispositivos para la medición de textura tienen elementos en común: la probeta y la celda, que son los elementos clave. Todos los demás elementos se pueden adaptar a la unidad multi-propósito y pueden servir para una gran cantidad de propósitos diferentes cuando se adaptan a distintas celdas.⁷⁶

En los equipos universales se utiliza un mismo mecanismo básico para llevar a cabo casi todos los métodos de prueba reportados en la literatura. Lo único que se necesita son los aditamentos especiales para contener la muestra o para montarla. Se pueden utilizar para compresión, tensión y cizallamiento.

Existe una gran gama de equipos que va desde unidades manuales muy sencillas hasta equipos automatizados. Algunos de estos equipos cuentan con cilindros hidráulicos y neumáticos y sistemas motorizados eléctricos.⁷⁷

⁷⁶ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods.

⁷⁷ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

INSTRON

Este dispositivo se ha utilizado en análisis de textura de diversos materiales biológicos, siendo sus aplicaciones más comunes los análisis clásicos como tensión, compresión y doblado, aunque también se puede utilizar en determinaciones más sofisticadas como histéresis, relajación, recuperación, energía de deformación y ruptura. El Instron se utiliza para analizar frutas, vegetales, carne, alimentos procesados, y productos de panificación entre otros. El modelo 1132 es el que se desarrolló para cubrir las necesidades de la industria alimenticia, sin embargo existe una gran variedad de modelos distintos.

El equipo está constituido principalmente por dos partes:

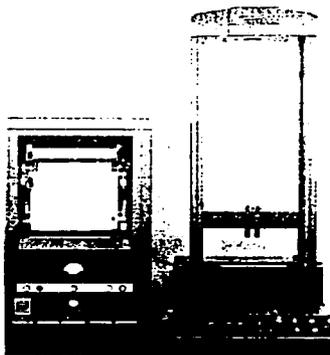
- Componente móvil: un bloque metálico se conduce en dirección vertical mediante un sistema de engranajes.
- Detector y registrador de fuerza: consta de celdas que alimentan la información a un graficador.

La longitud de los movimientos se controla automáticamente mediante interruptores. Las velocidades ascendentes y descendentes se pueden seleccionar dentro de un rango muy amplio simplemente cambiando los engranajes en el mecanismo. El Instron es un equipo muy resistente debido a que tiene un sistema de conducción firme, que no permite que el componente móvil tenga movimientos de rebote, además el sistema de pesado es de baja deflexión por la carga. Todo lo anterior sumado al hecho de que el sistema de carga tiene muy poca inercia mecánica propicia que el Instron produzca información prácticamente libre de interacciones entre el equipo y la muestra.⁷⁸

El Instron está diseñado de manera modular, por lo que se le pueden adaptar distintos aditamentos para que se puedan llevar a cabo determinaciones con movimientos apalancados (como el Texturómetro de General Foods), ya que este equipo está diseñado para ejecutar movimientos lineales ascendentes y descendentes, también se puede adaptar para pruebas de torsión. Existe además una gran variedad de celdas como la de Warner-Bratzler para el cizallamiento de carne, una gran gama de probetas de punción (incluyendo la de Magness-Taylor),

⁷⁸ Boume, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

distintos aditamentos para compresión, la celda de Kramer y la de Ottawa, de modo que se puede llevar a cabo una gran cantidad de determinaciones distintas con este equipo.



TEXTURÓMETRO DE GENERAL FOODS

El Texturómetro de General Foods es un equipo imitativo y simultáneamente multi-propósito. Tiene un diseño simple y consta principalmente de 3 partes:

- **Mecanismos de deformación:** Un articulador es conducido constantemente de arriba hacia abajo mediante un motor eléctrico. El articulador es una palanca con pivote cerca del centro del émbolo que está en contacto con la muestra en un extremo y en el otro con el mecanismo móvil. El movimiento de la palanca es sinusoidal.
- **Registrador de fuerza:** Una plataforma montada en un transductor que detecta y transmite la fuerza a un registrador es lo que le da soporte a la muestra bajo la palanca.
- **Celdas:** Los émbolos son lisos y planos, metálicos o de acrílico y varían en tamaño. Incluye una placa plana para

contener muestras sólidas y un contenedor para muestras líquidas y semi-líquidas.⁷⁹

Para eliminar los efectos de la gravedad el elemento sensor se ubica en el área de la muestra (y no en el brazo articulador). El texturómetro de General Foods se utiliza para el Análisis del Perfil de Textura (TPA) en el cual el émbolo comprime la muestra y modera su marcha cuando llega el final de la compresión, se detiene y se retira hacia arriba, en esta prueba se lleva a cabo una doble compresión. Este movimiento produce una deformación sinusoidal en la muestra, la cual se parece al movimiento de las mandíbulas humanas, y además causa una reacción viscoelástica en la muestra. Se obtienen gráficas fuerza-tiempo, pero la velocidad variable impide una conversión a curvas fuerza-distancia.⁸⁰

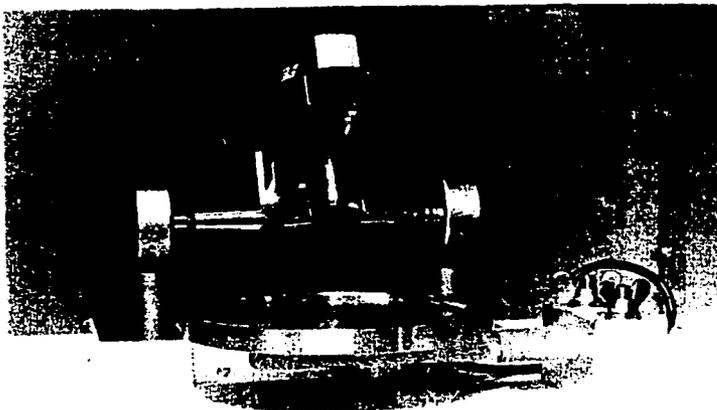
De la curva de TPA que se obtiene se han obtenido los 7 parámetros texturales principales:

- **Fracturabilidad:** es la fuerza registrada en la primera ruptura de la curva.
- **Dureza:** Es la fuerza máxima que se genera durante el primer ciclo de compresión, o "primera mordida".
- **Adhesividad:** Es el área bajo la curva de fuerza de cualquier pico negativo después del primer ciclo de compresión.
- **Cohesividad:** Es el cociente del área bajo la curva positiva de fuerza de la segunda compresión entre el área de la primera compresión.
- **Elasticidad:** Es la altura que recupera la muestra entre el final de la primera compresión y el inicio de la segunda.
- **Gomosidad:** Es el producto de dureza y cohesividad.
- **Masticabilidad:** Es el producto de elasticidad y gomosidad.⁸¹

⁷⁹ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

⁸⁰ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

⁸¹ www.ag.uiuc.edu/~fs401/CH8vol1.htm



La interpretación de las curvas del texturómetro de General Foods es sencilla y se basa en un sistema de clasificaciones que pretende interpretar parámetros mecánicos en términos de atributos texturales sensoriales, con lo que se facilita la correlación con un panel organoléptico. Pero obviamente, la calidad de estas correlaciones depende del tipo de panel y en cierto grado, del tipo de alimento.⁸²

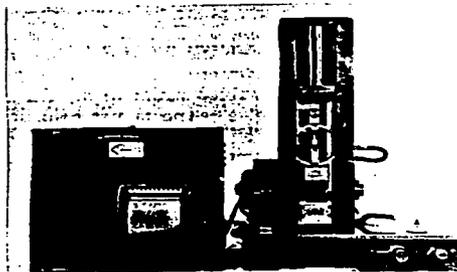
PRENSA DE TEXTURA

Este instrumento también es conocido como la Prensa de Kramer (KS, Kramer Shear Press) o "Texture Test System" y es el primer dispositivo universal que se creó para la determinación de propiedades texturales mediante movimientos lineales.

⁸² Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

La prensa de textura consta principalmente de dos partes:

- Prensa: un pistón hidráulico desciende a una velocidad determinada hacia la parte estacionaria que está sostenida por el bastidor y que contiene la muestra.
- Registrador de Fuerza: el sensor de fuerza es un transductor que proporciona una señal continua directamente proporcional a la fuerza aplicada, la cual se transfiere electrónicamente a un graficador.
- Celda: Originalmente, la KS tenía un recipiente estacionario rectangular con ranuras en la parte inferior para contener la muestra y una probeta movible compuesta por diez barras que comprimían y luego extruían la muestra, descendiendo hasta atravesar las barras inferiores. Actualmente se cuenta con distintas celdas como la celda para una cuchilla con un extremo cortante, la celda con una cara cortante en forma de V (similar a la de Warner-Bratzler), accesorios para pruebas de compresión, una celda tipo suculómetro, una celda para doblado y una para tensión.⁸³



⁸³ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

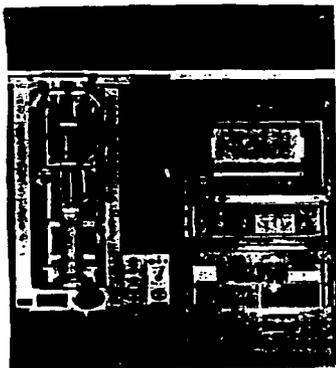
TEXTURÓMETRO DE OTTAWA (OTMS: OTTAWA TEXTURE MEASURING SYSTEM)

Este texturómetro se desarrolló para el análisis de los alimentos buscando combinar las ventajas de la Prensa de Textura de Kramer y del Instron eliminando sus desventajas, ya que se descubrió que la velocidad del pistón se controla mejor mediante un motor que de manera hidráulica.

- Prensa: el bastidor de aluminio tiene los controles del motor que conduce al pistón en la parte superior. El motor puede funcionar a una velocidad fija proporcionando un grado de deformación o a una velocidad variable.
- Registrador de Fuerza: La fuerza se detecta mediante un transductor. El equipo cuenta con un protector contra sobrecarga.
- Celda: Mediante adaptadores se pueden instalar celdas de otros equipos para medir textura. Las celdas diseñadas para este equipo son simples envases cuadrados en los cuales la muestra se comprime, cizalla y extruye mediante un émbolo a través de una rejilla de alambre o una placa perforada en la parte inferior.

Algunas de las celdas con las que cuenta el OTMS son para retro-extrusión, para punción, Warner-Bratzler, para compresión, doblado, el sistema de Kramer y para tensión, entre otras.⁸⁴

⁸⁴ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality



TEXTURÓMETRO DE STABLE MICRO SYSTEMS

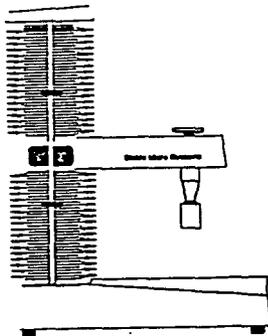
Los texturómetros de Stable Micro Systems son ideales para determinaciones de tensión, compresión, flexibilidad, esfuerzo constante y relajación en alimentos, productos químicos y farmacéuticos. La confiabilidad operacional se incrementa con la inclusión de un sistema de protección de sobrecarga mecánica y un monitoreo electrónico de modo que los dispositivos se pueden recuperar completamente y con toda seguridad de un impacto a toda velocidad.

Con el texturómetro de Stable Micro Systems es posible llevar a cabo mediciones de fuerza, distancia y tiempo en tensión, compresión y oscilación sinusoidal. Al igual que los demás equipos multi-propósito, este texturómetro se mueve verticalmente y gracias a que se le pueden adaptar distintas celdas, dispositivos y probetas es que se pueden llevar a cabo tantas determinaciones distintas.

Stable Micro Systems cuenta con varios dispositivos para el control de la temperatura, como cámaras o placas.

Se cuenta con gran variedad de probetas como las de extremo plano, las placas de compresión, probetas esféricas de distintos diámetros, probetas hemiesféricas y de aguja. También se tienen las mandíbulas de Volodkevich, distintas cuchillas, cortador de mantequilla, y una cuchara para helados.

Existe una variedad de accesorios como el tarro de Bloom, la celda de Kramer, dispositivos para pruebas múltiples con chicharos, untabilidad, fracturabilidad, panificación, pasta, el texturómetro de Ottawa (OTMS), celdas de extrusión y retroextrusión y el dispositivo para determinación de tensión en pizza.⁸⁵



⁸⁵ Texture Technologies Corp. Your Reference Manual for Texture Analysis

6. CARACTERÍSTICAS DE LOS ALIMENTOS LÍQUIDOS

6.1. CONSIDERACIONES BÁSICAS

VISCOSIDAD

Los materiales líquidos o fluidos se clasifican mediante la medición de su viscosidad, que es la resistencia al flujo, debida a la fricción interna del fluido. La fuerza de fricción puede considerarse como la energía requerida para mover un objeto que se roza contra otro objeto; la viscosidad mide la fricción interna que se resiste al movimiento de cada capa del fluido cuando ésta se mueve sobre la capa adyacente de fluido. Un material muy viscoso tiene una gran fricción interna, y no se extenderá tan fácilmente como uno de una viscosidad baja.

Los principales factores que influyen en la viscosidad son la temperatura, la concentración de soluto en la solución así como el peso molecular del mismo, la presión y la materia suspendida. De lo anterior se derivan los distintos comportamientos de flujo que son el Newtoniano y el No Newtoniano.⁸⁶

Los alimentos fluidos existen en una gran variedad de formas físicas, que según su comportamiento viscoso se clasifican como simples líquidos newtonianos o no-newtonianos.

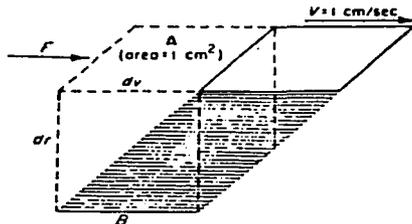
6.1.1. FLUIDOS NEWTONIANOS

Los líquidos newtonianos fluyen a un grado constante a una presión constante y a un grado estrictamente proporcional a cada presión que se les aplica. Los aceites vegetales, gases, líquidos o soluciones de bajo peso molecular y soluciones de bajas concentraciones en caso de que sean polímeros de alto peso molecular, son fluidos newtonianos.

Para comprender el flujo newtoniano se puede considerar a dos placas paralelas A y B con un área A de 1 cm^2 , separadas por un espacio de 1 cm lleno de líquido. La viscosidad es igual a la fuerza F que se requiere para inducir a una unidad de grado de cizallamiento. La profundidad d de la sustancia es de 1 cm . Si se requiere una fuerza F de

⁸⁶ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

1 dina para mover la placa A a una velocidad constante de 1 cm por segundo, entonces la viscosidad de la sustancia será de 1 poise.⁸⁷



En la infinitud de capas paralelas de la sustancia se tendrá que mover una capa tras otra una vez que la placa A se haya desplazado. Las capas superiores a A viajarán a una velocidad mayor que A. Cada placa de la sustancia viajará delante de la inferior y detrás de la superior. Como las capas se adhieren unas con otras, existe una fuerza que se opone a este movimiento, y esta es la viscosidad (η), o fricción interna del sistema por unidad de área y es la misma para cada capa. Por lo tanto, la viscosidad es una medida del efecto combinado de adhesión y cohesión. Debido a lo anterior, la fuerza transmitida F es proporcional al coeficiente de fricciones internas:

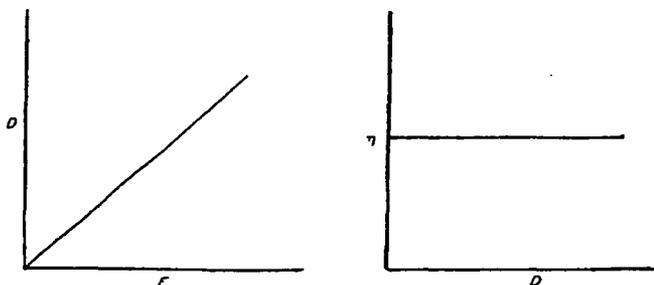
$$F = \eta A(dv/dr)$$

Donde (dv/dr) o D, es el grado de cizallamiento y es directamente proporcional a la fuerza aplicada F, y el flujo comienza bajo la mínima presión. La curva característica del flujo newtoniano pasa por el origen de la gráfica de D vs F.

Los fluidos newtonianos presentan una proporcionalidad directa entre esfuerzo de cizallamiento (F) y grado de cizallamiento (D). A cualquier temperatura estos materiales tienen una viscosidad que es independiente del grado de cizallamiento. En términos simples, se requiere el doble de fuerza para mover el líquido a una velocidad con una

⁸⁷ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

magnitud doble. Como se puede ver, la relación entre la fuerza de cizallamiento y el grado de cizallamiento es una línea recta y la viscosidad, en unidades absolutas, es la pendiente inversa de la línea. La viscosidad de los líquidos newtonianos permanece constante aún que el grado de cizallamiento cambie.



88

6.1.2. FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Los líquidos cuyo grado de flujo no es proporcional a la presión que se les aplica son los fluidos no-newtonianos y éstos comprenden soluciones o fundidos de materiales poliméricos de alto peso molecular (al menos que se encuentren extremadamente diluidos) suspensiones de sólidos en líquidos (las cuales se vuelven más no-newtonianas al incrementarse su contenido de sólidos, especialmente si el material tiende a hincharse, solvatare o a asociarse con la fase líquida) sistemas dispersos como emulsiones (mantequilla ó margarina), estructuras celulares (frutas y vegetales) y estructuras fibrosas (carne).⁸⁹

El flujo no-newtoniano se caracteriza por el hecho de que la viscosidad no es directamente proporcional al grado de cizallamiento, pero varía con el grado de cizallamiento en ciertos sistemas, y es

⁸⁸ Cerón, E. Exposición ATAM 2000

⁸⁹ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

además dependiente del tiempo. Estos sistemas exhiben una viscosidad que cambia con el grado de cizallamiento y de manera no directamente proporcional.

El flujo no-newtoniano se puede comprender mejor desde un punto de vista mecánico. Cuando objetos no simétricos pasan unos sobre otros, como ocurre durante el flujo, el tamaño, forma, y cohesividad del material determinarán la fuerza que se requiere para mover las partículas. A un grado distinto de cizallamiento, las partículas pueden encontrarse acomodadas de manera distinta y puede requerirse más o menos fuerza para moverlas. Los objetos no simétricos pueden ser moléculas grandes, partículas coloidales u otros materiales suspendidos como barro, fibras o cristales.

En los sistemas no-newtonianos las propiedades coloidales tienen mayor importancia que las moleculares. Las propiedades coloidales más relevantes de las partículas son:

- Forma
- Tamaño
- Flexibilidad y facilidad de deformación
- Solvatación mediante la fase continua
- Presencia y magnitud de cargas eléctricas.

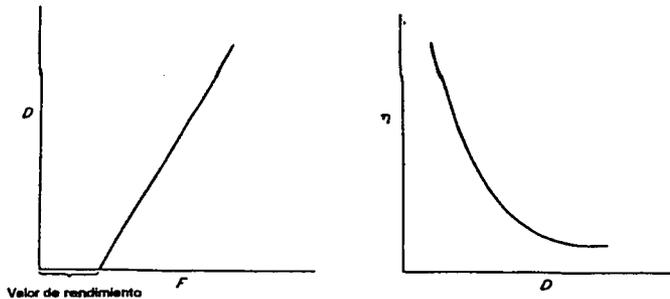
El comportamiento no-newtoniano es más pronunciado a grados de cizallamiento intermedios; a grados extremadamente bajos o altos, muchos sistemas no-newtonianos se aproximan al comportamiento newtoniano.

De la gran cantidad de comportamientos no-newtonianos que se conocen, en el estudio de los alimentos los de mayor importancia y consideración son los siguientes: el plástico de Bingham, el pseudoplástico, la dilatancia, el flujo tixotrópico y el reopéxico.

PLÁSTICO DE BINGHAM

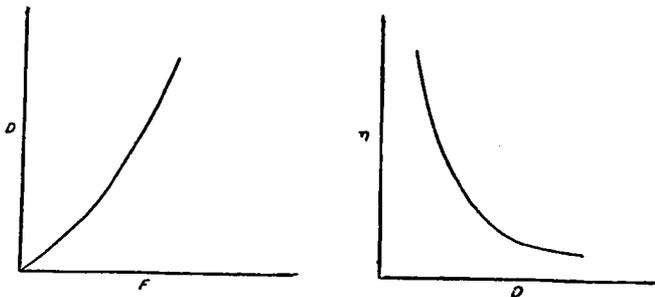
Este tipo de sistemas presenta una pérdida en la viscosidad con el incremento del grado de cizallamiento después de que se ha sobrepasado el punto de rendimiento. Es necesario superar una

resistencia inicial del material mediante una fuerza mínima con el fin de que comience el flujo del material. Una vez que se alcanza este punto de rendimiento comienza el movimiento y la sustancia se comporta como un fluido newtoniano. El mejor ejemplo para describir este comportamiento es la salsa catsup.



FLUJO PSEUDOPLÁSTICO

Un material pseudoplástico fluye más fácilmente cuando se somete al cizallamiento, se trata de una ruptura irreversible de la estructura y presenta una viscosidad decreciente con el incremento del grado de cizallamiento.



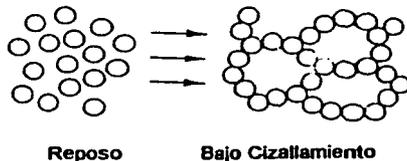
El decremento de la viscosidad es una consecuencia del acomodo molecular que ocurre en este tipo de materiales. A este tipo de material se le llama "estructuralmente viscoso", lo cual indica que con el flujo se lleva a cabo un cambio interno en la estructura. Existe una relación estrecha entre el grado de cizallamiento y la fuerza de cizallamiento, y un cambio en la primera siempre causa un cambio no directamente proporcional en la segunda. Un grado de cizallamiento incrementado orienta las moléculas de modo que se disminuye la fricción interna del fluido, lo cual se observa con un decremento en la viscosidad.



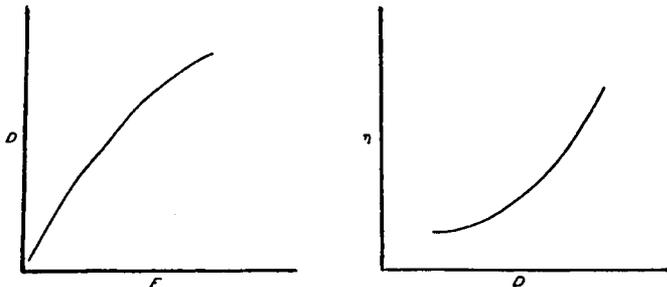
Las determinaciones con materiales pseudoplásticos son reproducibles y dependientes solamente del grado de cizallamiento y de la temperatura. El tiempo no influye en los materiales pseudoplásticos y el proceso es reversible mientras que las moléculas se desorganicen una vez que ha cesado la fuerza de cizallamiento. Si se aplica una fuerza de cizallamiento extremadamente elevada el flujo laminar se transformará en flujo turbulento, lo cual causará un incremento en la viscosidad. Este comportamiento es típico en muchas emulsiones.

DILATANCIA

Los materiales dilatantes presentan un incremento en la viscosidad al incrementarse el grado de cizallamiento y frecuentemente llegan al punto donde el fluido se convierte en sólido. Cuando un fluido dilatante está en reposo sus partículas constituyentes se encuentran juntas y cualquier flujo causará una expansión o dilatación de los espacios entre las partículas.



Entonces el medio de dispersión se vuelve insuficiente para saturar el sistema, de modo que aparentemente éste se seca. La viscosidad aumenta con el incremento de la fuerza de cizallamiento o el flujo. Un buen ejemplo para este comportamiento es la arena en la playa; cuando hay suficiente agua presente, todas las partículas de arena y los espacios que hay entre ellas están llenos de agua, de esta manera el sistema fluiría. Pero si se incrementa la fuerza de cizallamiento cuando la arena húmeda es pisada, los espacios entre las partículas se dilatan, creando espacios que drenan el agua de las partículas adyacentes. La fricción aumenta debido a que el agua ya no es suficiente para cubrir todas las partículas y por lo tanto el sistema se solidifica. El proceso es reversible, ya sea cesando la fuerza de cizallamiento o añadiendo más agua.



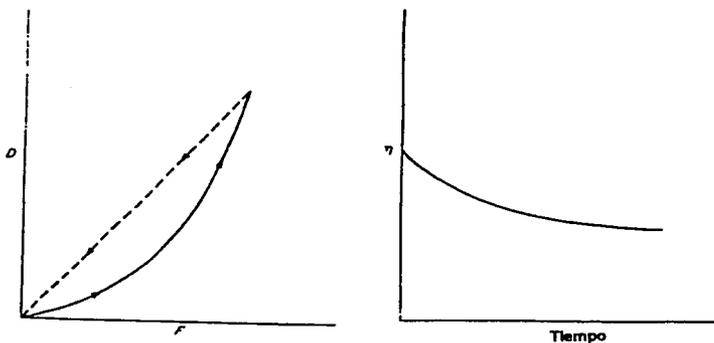
FLUJO TIXOTRÓPICO

Formalmente, la tixotropía se define como una transición reversible gel-sol-gel y es causada por la formación de una estructura definida dentro del material. La estructura gelificada se transforma en sol mediante agitación, y al dejarse en reposo ésta vuelve a tomar la forma de un gel. Este fenómeno se basa en el vencimiento de las fuerzas activas entre las partículas que se reestablecen mediante el reposo.

La tixotropía se caracteriza por el hecho de que la agitación produce una disminución en la viscosidad y en que la viscosidad original solamente se reestablece después de un periodo de reposo. Este tipo de sistema presenta un efecto de histéresis en su curva de flujo, lo cual se obtiene incrementando el grado de cizallamiento y a continuación

disminuyéndolo sin detener el cizallamiento. De esta manera se puede ver que la viscosidad, a cualquier grado de cizallamiento, dependerá de la cantidad de cizallamiento a la que haya sido expuesta previamente.

Conforme el material se somete a cizallamiento constante la caída en la viscosidad está en función del tiempo. Algunas sustancias tixotrópicas presentan este decremento en la viscosidad durante algunos días, mientras que otras sólo requieren de unos cuantos segundos para recuperar su viscosidad original.



En general la tixotropía se caracteriza por las siguientes propiedades:

1. Viene acompañada por un cambio estructural causado por un trastorno mecánico en el sistema
2. El sistema recupera su estructura original cuando se deja en reposo

3. La curva de flujo (grado de cizallamiento vs. esfuerzo de cizallamiento) del sistema presenta un "recodo" de histéresis.

REOPEXÍA

Las sustancias reopéticas presentan un incremento en la viscosidad con una fuerza de cizallamiento constante, como se puede observar al batir la clara de huevo. El sistema se vuelve más espeso y la estructura solidifica con el avance de la curva. Por lo tanto este sistema es dependiente del tiempo, pero de manera inversa que el sistema tixotrópico, ya que con el tiempo, la sustancia recuperará su estado líquido original, si no se ha llevado a cabo una transformación de fase o química.

PRINCIPALES SISTEMAS REOLÓGICOS ALIMENTICIOS

SISTEMA	EFECTO DE CIZALLAMIENTO			EFECTO DEL TIEMPO		DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS EN ALIMENTOS	
	ADENSIZANTE	ESPAESANTE	LINEAL	INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE			
NEWTONIANO			X	X		La representación gráfica comienza en el origen y existe una relación directa entre esfuerzo de cizallamiento y grado de cizallamiento	Jarabe de maple, jarabe de maíz, caldos, leche homogenizada, bebidas carbonatadas	
NO-NEWTONIANO	PLÁSTICO DE BINGHAM		X	X		Existe una relación directa entre el esfuerzo de cizallamiento y el grado de cizallamiento. Se necesita vencer una resistencia inicial antes de que el sistema fluya como un sistema Newtoniano	Chocolate, mantquilla, queso, helados, productos untables	
	PSEUDO-PLÁSTICO	X			X	La sustancia fluye más fácilmente con la aplicación de cizallamiento y su viscosidad disminuye al aumentar el grado de cizallamiento	Mantequilla endurecida, pastas tipo pel y pudines	
	TIXOTRÓPICO	X				X	Igual que el pseudoplástico, pero la viscosidad original se recupera después de un periodo de reposo	Miel con impurezas proteínicas, mayonesas, catsup y salsas
	DILATANTE		X		X		La sustancia fluye menos a medida que se bate o somete a cizallamiento, la viscosidad aparente se incrementa con el cizallamiento	Miel con impurezas del tipo de dextranas
	REOPÉCTICO		X			X	Igual que el dilatante pero la viscosidad original se recupera después de un periodo de reposo.	Batido de clara de huevo o de "creme chertuby"

6.2. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS FLUIDOS

6.2.1. DETERMINACIONES EN ALIMENTOS FLUIDOS

6.2.1.1. MÉTODOS FUNDAMENTALES

Como ya se describió en el caso de los alimentos sólidos, los métodos fundamentales miden características físicas definidas, y su uso no se limita exclusivamente a los alimentos. Estos métodos son ideales en la determinación de parámetros físicos, sin embargo no es sencilla su correlación con la evaluación sensorial.

Como se mencionó anteriormente, la viscosidad es el parámetro de importancia en las determinaciones con alimentos líquidos, la cual se determina utilizando viscosímetros, los cuales se clasifican según el principio bajo el cual se rigen.⁹¹

VISCOSÍMETROS CAPILARES

En este tipo de dispositivo se mide el tiempo necesario para que un volumen estándar de fluido pase a través de un tubo capilar. Este tipo de flujo se describe mediante la ecuación de Poiseuille:

$$\eta = \pi r^4 t / 8 V l,$$

donde η es la viscosidad del fluido, p la presión (usualmente generada por la fuerza de gravedad que actúa sobre la columna de líquido, aunque en algunos casos se puede generar mediante la aplicación de aire comprimido o por medios mecánicos), r el radio del tubo capilar, t el tiempo, V el volumen y l la longitud del tubo.

Los viscosímetros capilares se usan en determinaciones de fluidos Newtonianos debido a que su grado de cizallamiento varía durante la descarga, sin embargo también se utilizan ampliamente en determinaciones de fluidos no-newtonianos de baja a mediana viscosidad.⁹²

⁹¹ <http://osu.orst.edu/food-resource/texture/index.html>

⁹² Steffe, J., Rheological Methods in Food Processing Engineering

VISCOSÍMETRO DE OSTWALD

El viscosímetro de Ostwald es uno de los viscosímetros capilares más sencillos que existen, sin embargo existe una gran variedad de modificaciones con distintas ventajas cada una.

Al trabajar con un viscosímetro de Ostwald no es necesario que éste se encuentre en posición vertical, sin embargo, el ángulo de inclinación al cual se lleva a cabo la determinación sí debe ser siempre el mismo para que los resultados sean reproducibles. También se debe mantener la temperatura constante.

El fluido a analizar se vacía por el tubo *C* pasando por el bulbo *D* y el tubo en *U E*. El viscosímetro se sumerge en un baño a temperatura constante hasta que el fluido alcanza esa temperatura y se estabiliza. Se aplica succión en la parte superior del brazo *B* haciendo pasar al líquido por el capilar *F* y el bulbo *G* hasta el que el menisco alcanza la marca *um*. Se retira la succión y se toma el tiempo que el líquido necesita para viajar de *um* a *lm* y a partir del tiempo se calcula la viscosidad.⁹³

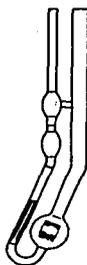
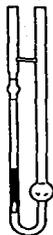
VISCOSÍMETRO DE CANON-FENSKE

El viscosímetro de Canon-Fenske deriva del viscosímetro de Ostwald, sin embargo en él se elimina el error debido a la desviación vertical. Ambos bulbos se encuentran exactamente en el mismo eje y el tubo capilar está inclinado.

VISCOSÍMETRO DE UBBELOHDE

En el viscosímetro de Ubbelohde se elimina la desventaja que tienen los viscosímetros de Ostwald y Canon-Fenske de trabajar siempre con el mismo volumen. En este viscosímetro se une un tercer tubo al bulbo que se encuentra en el extremo inferior del capilar, con lo cual se logra mantener fijo el nivel del líquido en la parte inferior. Este viscosímetro, a diferencia del viscosímetro de Ostwald opera mediante aplicación externa de presión.

⁹³ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement



Viscosímetro de Ostwald

Viscosímetro de Canon-Fenske

Viscosímetro de Ubbelohde

94

VISCOSÍMETRO DE LAMB-LEWIS

Este viscosímetro se utiliza en control de calidad de néctares para establecer estándares de calidad internos. Consta de un recipiente, de cuyo fondo sale un tubo capilar de pirex. El recipiente se llena con el líquido en cuestión. Se deja fluir el líquido hasta que se tenga un flujo estable. Se tapa la salida del capilar con el dedo para detener el flujo y el recipiente se llena, se retira el dedo y se toma el tiempo que el menisco tarda en alcanzar la línea de calibración.

VISCOSÍMETRO DE CILINDRO Y PISTÓN

En este tipo de dispositivo se tiene un recipiente cilíndrico que es llenado con el líquido en cuestión. Mediante un pistón se desplaza el líquido contenido en el recipiente. Este mecanismo que acciona el pistón puede ser un peso muerto, una fuerza neumática o mecánica o una presión hidráulica. Este instrumento es adecuado para trabajar con líquidos no-newtonianos, ya que su estructura soporta presiones elevadas.⁹⁵

⁹⁴ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

⁹⁵ Villamil, R.M., Aproximación a la Reología. Teoría, Aspectos Prácticos e Investigación en Alimentos

VISCOSÍMETRO DE ORIFICIO

Este tipo de viscosímetros puede ser visto como un viscosímetro de tubo capilar muy corto. Se mide el tiempo que un volumen estándar de líquido tarda en pasar a través de un orificio. Es un método rápido, sencillo y económico que se utiliza ampliamente en líquidos newtonianos y no-newtonianos cuando no se requiere demasiada precisión. El más conocido de estos viscosímetros es el de inmersión de Zahn, que consta de un recipiente en forma de copa con un orificio en el fondo, tiene una asa para ser sostenido. El viscosímetro se sumerge en el líquido para su llenado y se retira, en ese momento se toma el tiempo hasta que ocurre la primera ruptura en el flujo que sale por el orificio inferior de la copa.⁹⁶

VISCOSÍMETROS ROTACIONALES

VISCOSÍMETROS DE CILINDROS COAXIALES

Los viscosímetros rotacionales se utilizan con materiales no-newtonianos, este tipo de viscosímetro permite mediciones continuas bajo condiciones establecidas y además permite el estudio de efectos relacionados con el tiempo. Este viscosímetro consiste generalmente de un envase que gira a una velocidad ω , y una aspa de altura h y radio r_1 suspendida de manera estacionaria en su interior por medio de un alambre (otra opción es inversa; el contenedor con la muestra permanece inmóvil mientras que la aspa gira dentro del mismo). La muestra se coloca en el envase. La fuerza de torsión que se genera en el alambre para mantener la aspa (o el envase) estacionaria se considera como una medida de la consistencia del material que se está probando. A cualquier distancia r del centro la torsión es igual al esfuerzo de cizallamiento \times área de superficie \times radio:

$$T = 2\pi r^2 h F_r$$

Donde T es la torsión, h la altura de la aspa y F_r el esfuerzo de cizallamiento a un radio de r .

El esfuerzo de cizallamiento es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del eje de rotación. Si la distancia entre el huso y el envase ($r_2 - r_1$) es pequeña en comparación con r_1 , el esfuerzo de

⁹⁶ Boume, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

cizallamiento dentro de la muestra es prácticamente constante. El grado de cizallamiento D_r está dado por:

$$D_r = r (d\omega / dr)$$

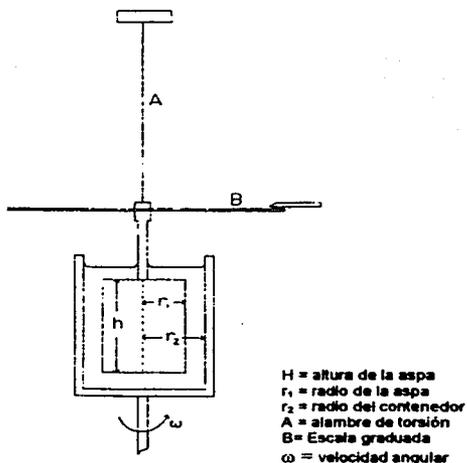
Para un instrumento particular bajo condiciones estables, la velocidad angular ω es igual a cero cuando $r = r_1$, y $\omega = \Omega$ cuando $r = r_2$ y se aplica la siguiente ecuación:

$$T = C\eta\Omega,$$

$$\eta = T / C\Omega$$

donde C es la constante del instrumento.

97



⁹⁷ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

VISCOSÍMETRO DE MACMICHAEL

Este es el típico viscosímetro rotacional que consta de un recipiente y un cilindro interno suspendido por medio de un alambre. El material en cuestión se coloca dentro del recipiente y el cilindro interno se sumerge en él. El recipiente se hace girar y la fuerza de torsión que requiere el alambre para mantener estacionario al cilindro interno se toma como medida de la consistencia del material de prueba.

VISCOSÍMETRO DE BROOKFIELD

Este instrumento tiene un funcionamiento inverso al del viscosímetro de Mac Michael, ya que el recipiente que contiene la muestra se mantiene inmóvil y un huso se hace girar dentro del recipiente. El huso puede ser de distintos tamaños y formas, dependiendo de las características de la muestra. Existe una gran variedad de modelos de viscosímetros de Brookfield.⁹⁸

VISCOSÍMETROS DE TORSIÓN

VISCOSÍMETRO DE STORMER

En este viscosímetro se mantiene una torsión constante mediante una carga suspendida de un sistema de poleas conectado a una aspa rotatoria. La aspa gira a un grado de aceleración hasta se llega a la velocidad angular de equilibrio (cuando la resistencia viscosa del fluido coincide exactamente con la potencia generada por el peso suspendido). En este momento se cuentan las revoluciones que se dieron durante el intervalo de tiempo.⁹⁹

VISCOSÍMETRO DE HAAKE

Este viscosímetro es más sofisticado: el sistema de medición se encuentra inmerso en un baño a temperatura constante. Dentro de una consola se encuentra el sistema electrónico y de manejo, el cual es un motor que rota a 10 velocidades distintas. Se mide la torsión. Existe una gran gama de modelos de viscosímetro de Haake.

⁹⁸ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

⁹⁹ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

VISCOSÍMETRO DE CONO Y PLATO

En este tipo de viscosímetros también se mide la torsión: el fluido se mantiene entre un cono de pequeño ángulo y una superficie plana que apenas toca, por su propia tensión superficial. La torsión se mide haciendo girar una de las partes del dispositivo y dejando la otra estacionaria.

Para fluidos newtonianos se tiene la siguiente ecuación

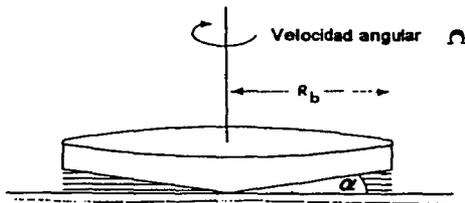
$$\eta = 3\alpha M / 2\pi R_b^3 \Omega,$$

donde η es la viscosidad absoluta, α el ángulo del cono (por lo general menor a 2°), M la torsión, R_b el radio del cono, y Ω la velocidad angular de la parte que gira. Para un instrumento dado con una geometría dada la ecuación anterior se reduce a

$$\eta = KM/\Omega,$$

donde K es la constante del instrumento $3\alpha/2\pi R_b^3$.

Una gran ventaja de este tipo de equipo es que siempre y cuando el ángulo del cono sea pequeño, el grado de cizallamiento será uniforme en todos los puntos del fluido. Esto hace que este viscosímetro sea adecuado para fluidos no-newtonianos.¹⁰⁰



¹⁰⁰ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

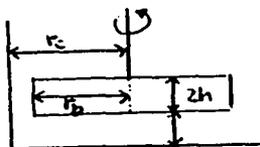
VISCOSÍMETRO DE DISCO

Este tipo de viscosímetro puede verse como un viscosímetro de cilindros coaxiales en el cual el cilindro interior ha sido sustituido por un disco. Estos viscosímetros constan de un recipiente estático de radio r_c , en cual se sumerge un disco de espesor $2h$ y radio r_b , la distancia de la parte inferior del disco a la base del recipiente es l , y el disco gira a una velocidad angular Ω .

En estos casos se tiene la siguiente ecuación para expresar la torsión:

$$T = \mu r^4 \pi \Omega / l$$

101



OTROS VISCOSÍMETROS

VISCOSÍMETRO DE ESFERA DESCENDENTE

Este tipo de viscosímetro funciona calculando el tiempo que una esfera tarda en caer una distancia conocida a través de un líquido bajo la influencia de la gravedad. A menor densidad del material de la esfera, más lentamente caerá y viceversa. El diámetro de la esfera debe ser mucho menor al del tubo para evitar el efecto de las paredes. Este dispositivo se utiliza en fluidos newtonianos y funciona según la ley de Stokes:

¹⁰¹ Villamil, R.M., Aproximación a la Reología. Teoría, Aspectos Prácticos e Investigación en Alimentos

$$\eta = [2/9(\rho_s - \rho)gR^2]/V,$$

donde η es la viscosidad, ρ_s la densidad de la canica, ρ_l la densidad del líquido, R el radio de la esfera, g la gravedad y V la velocidad límite.

VISCOSÍMETRO DE ESFERA RODANTE

Este viscosímetro es semejante al de esfera descendente; se mide la velocidad a la cual una esfera rueda dentro de un tubo cilíndrico lleno de líquido y con un grado de inclinación conocido. Este dispositivo se utiliza solamente para fluidos newtonianos en flujo laminar. La viscosidad del fluido se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = K(\rho_s - \rho) / v$$

donde μ es la viscosidad, K la constante del instrumento, v la velocidad de descenso de la esfera, ρ_s la densidad de la esfera y ρ la densidad del líquido.¹⁰²

VISCOSÍMETRO OSCILATORIO

Este viscosímetro opera bajo el principio de "cargado de superficie". Una probeta esférica o cilíndrica se sumerge en el medio, generando una onda de cizallamiento por medio de. El recipiente debe ser suficientemente grande para que las fuerzas de cizallamiento no lleguen a la pared y regresen a la probeta. Se obtienen mejores resultados con fluidos newtonianos.

Se tiene la siguiente ecuación para la distancia de propagación para la amplitud de la onda de cizallamiento que cae hasta $1/e$ de su valor en un fluido newtoniano:

$$\delta = (2\eta)^{1/2}/\omega\rho,$$

donde δ es la distancia de propagación, η la viscosidad del fluido, ρ la densidad y ω la frecuencia vibracional.¹⁰³

¹⁰² Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

¹⁰³ Steffe, J., Rheological Methods in Food Processing Engineering

VISCOSÍMETRO DE CIZALLAMIENTO ULTRASÓNICO

El espectrómetro ultrasónico de cizallamiento se desarrolló para la medición de parámetros reológicos de cizallamiento dinámico de alta frecuencia en muestras de miel. Este método solamente es adecuado para muestras relativamente viscosas.

6.2.1.2. MÉTODOS EMPÍRICOS

Como ya se había mencionado detalladamente en el caso de los alimentos sólidos, mediante los métodos empíricos se miden parámetros que generalmente no están muy claramente definidos y los cuales, según la experiencia práctica, están muy relacionados con la calidad de la textura y con el análisis sensorial.

CONSISTÓMETROS

El nombre consistómetro se le ha dado a varios tipos de instrumentos empíricos utilizados para analizar alimentos fluidos y semisólidos, sin embargo ninguno de estos dispositivos mide la consistencia en un sentido reológico. De acuerdo con Reiner y Scott Blair la consistencia es la propiedad por la cual un material resiste un cambio permanente de forma.

Los consistómetros se subdividen en dos categorías principales: los dispositivos que miden la distancia de untado y los que miden la resistencia hacia un huso, eje, o una paleta rotatoria.¹⁰⁴

CONSISTÓMETRO DE ADAMS

Este dispositivo mide el área en la cual será untada una cantidad dada de muestra bajo una serie de condiciones determinadas. Las muestras deben ser lo suficientemente fluidas para poder fluir en las condiciones que requiere esta prueba. El equipo consta de un gran disco metálico o de plástico en cuya superficie hay 20 círculos concéntricos grabados a 1/4" de distancia entre sí, y un cono truncado de acero el cual embona exactamente en el disco de modo que su circunferencia coincide con el círculo del centro. El cono se presiona contra el centro del disco,

¹⁰⁴ Kulmyrzacv, A. y Mc. Clements, D. J., High Frequency Dynamic Shear Rheology of Honey

se llena con la muestra y se levanta verticalmente permitiendo que el material de muestra fluya libremente sobre el disco. El grado de flujo se determina después de 30 segundos promediando la distancia de esparcimiento en cuatro distintos puntos del cuadrante del disco. Este tipo de consistómetros también se ha utilizado en conservas de frutas, aderezos para ensalada y rellenos de pies. Estas mediciones involucran una serie de parámetros físicos, incluyendo tensión superficial y fricción.

CONSISTÓMETRO DE BOSTWICK

Este dispositivo mide la distancia que correrá una cantidad dada de muestra semisólida, sobre una superficie inclinada al ser vaciada de su contenedor. Este instrumento consta de una placa con dos compartimentos, el primer compartimento contiene la muestra y cuando éste se abre el material fluye al segundo compartimento. Las muestras deben ser lo suficientemente fluidas para poder fluir en las condiciones que requiere esta prueba. Esta prueba es el método que se utiliza oficialmente en la Asociación Nacional de Enlatadores para medir la consistencia de la salsa catsup y se ha extendido hacia otros productos concentrados de tomate como pastas, salsas y puré. En algunos casos, cuando las pastas tienen un contenido de sólidos demasiado elevado (30-35%) es necesario recurrir a otros métodos.

PLOMADA DE HILKER-GUTHRIE

Este dispositivo se desarrolló para medir la consistencia o "cuerpo" de la crema fermentada, pero se puede utilizar en productos de consistencia similar. La plomada es un cilindro de aluminio que pesa 15 g aproximadamente y tiene una escala inscrita. La plomada se monta en un soporte vertical a 12 plg de la superficie de la muestra y se deja caer libremente. En la escala de la plomada se lee la profundidad de la penetración después de 5 segundos.¹⁰⁵

6.2.1.3. INSTRUMENTOS IMITATIVOS

Estos mecanismos reproducen las condiciones a las cuales se somete el alimento en una operación humana específica tal como la

¹⁰⁵ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

mordida, el untado y el amasado. (Ver más detalles en alimentos sólidos).¹⁰⁶

VISCOAMILÓGRAFO DE BRABENDER

Este dispositivo mide el comportamiento aparentemente viscoso de pastas elaboradas a partir de harinas cuando son sujetas a calentamiento y enfriamiento. El amilógrafo es un viscosímetro de torsión que proporciona lecturas constantes de cambios en la viscosidad a un grado constante de incremento de temperatura. Este dispositivo consta de una copa que gira a velocidad constante y está inmersa en un baño de aire para controlar la temperatura. La viscosidad se determina en forma de la torsión que se detecta en la unidad de medición, la cual consta de un disco con varillas cortas que se extienden hacia la muestra. Debido a que no se conoce el valor de la constante del instrumento, los resultados se expresan en unidades arbitrarias, conocidas como unidades "Bravender". Actualmente, es el método estándar para el análisis de la actividad de la α -amilasa en harina de trigo: a mayor actividad, menor viscosidad debido al efecto de licuefacción de la enzima.¹⁰⁷

FARINÓGRAFO DE BRABENDER

El farinógrafo de Brabender es un mezclador de masa de harina que mide la torsión y por lo tanto la plasticidad y la movilidad de la masa mediante un mezclado suave. La resistencia de la masa hacia las espas mezcladoras con forma de Z se transmite a un graficador. El farinógrafo proporciona información inherente a la temperatura óptima de mezclado y la estabilidad de la masa ante el mezclado prolongado, así como de la cantidad necesaria que se le debe añadir a la harina para obtener una consistencia adecuada.

MIXÓGRAFO

El mixógrafo mide la resistencia que presenta una masa de harina dentro de un tazón frente a cuatro espas verticales que pasan a través de 3 espas estacionarias; se genera una fuerza que desvía al tazón de su posición original. La torsión es proporcional a la fuerza de

¹⁰⁶ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

¹⁰⁷ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

cizallamiento y la elasticidad de la masa y proporciona un índice de fuerza de la masa.

RESISTÓGRAFO

El resistógrafo se desarrolló para cubrir las necesidades de la nueva tecnología de la industria de la panificación, ya que actualmente se procesa la masa en mezcladoras a altas velocidades de amasado y con grandes estiramientos. La masa elaborada de este modo es distinta a la masa preparada de manera tradicional, donde el mezclado se da más por presión que por estiramiento. El resistógrafo combina los procesos de mezclado con estiramiento, presión y amasado, por lo que sirve para evaluar el mezclado a altas velocidades.

VISCOSÍMETRO PARA MAÍZ

Mediante este instrumento se detectan los cambios en la viscosidad en suspensiones y pastas de almidón de maíz. Este viscosímetro opera mediante un motor a velocidad constante. La muestra se coloca dentro del viscosímetro, que consta de un recipiente de acero inoxidable con baño de control de temperatura y un doble agitador que combina la propela y el raspador.¹⁰⁸

¹⁰⁸ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

7. SELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PRUEBA ADECUADO

Antes de seleccionar el tipo de prueba que se va a implementar es indispensable analizar ciertos factores, de lo contrario pueden generarse enormes pérdidas de tiempo y dinero.

7.1. FACTORES QUE DEBEN SER CONSIDERADOS

MÉTODO INSTRUMENTAL O SENSORIAL

La primera decisión que debe tomarse es si se utilizara un método instrumental o sensorial, las principales ventajas de los métodos instrumentales son su precisión, reproducibilidad, rapidez y que son menos laboriosos que la evaluación sensorial. Por otra parte, en algunas ocasiones la evaluación sensorial es el único método adecuado para la obtención de resultados válidos.

NATURALEZA Y PROPÓSITO DE LA PRUEBA

El instrumento que será seleccionado para las pruebas depende del tipo de material que se someterá a evaluación (líquido, sólido, quebradizo, plástico, homogéneo, heterogéneo). También se debe tomar en consideración si la prueba se llevará a cabo con fines de control de calidad, para estandarización, para desarrollo de productos o investigación básica. Por otra parte, como se ha visto a lo largo de todo este escrito, existe una gran variedad de equipos que van desde los más sencillos y económicos hasta los más sofisticados y costosos. Los equipos sencillos y económicos son fáciles de manejar y no se necesita una gran capacitación para su manejo, mientras que los equipos sofisticados deben ser operados por una persona capacitada.

PRECISIÓN

Otro punto que debe resolverse es la precisión que se requiere. Se obtiene mayor precisión en los resultados cuando el número de repeticiones de la prueba es mayor. Por lo general una muestra de tamaño grande da resultados más cercanos a la realidad que una muestra pequeña, y por lo tanto no es necesario llevar a cabo muchas repeticiones. Sin embargo una muestra de tamaño mayor generalmente implica que se involucran fuerzas de mayor magnitud y que la capacidad

del instrumento puede ser excedida, por lo que es preferible utilizar muestras pequeñas llevando a cabo un gran número de replicas.

MÉTODO DESTRUCTIVO O NO-DESTRUCTIVO

Los métodos destructivos arruinan la estructura de la muestra, por lo que la muestra solamente se puede utilizar para una sola determinación. Por el contrario, los métodos no-destructivos dejan la muestra intacta, de modo que se pueden llevar a cabo más determinaciones con la misma. Debido a que la mayoría de los parámetros texturales de los alimentos se perciben en la boca y a que la masticación es un proceso destructivo, es lógico que generalmente las pruebas destructivas sean las más adecuadas.

COSTOS

Al analizar cuanto dinero se invertirá en la metodología se debe incluir el costo inicial del equipo, su mantenimiento y costos de operación y refacciones. Un equipo simple puede ser operado por personas poco capacitadas, mientras que uno sofisticado necesita ser manejado por personal más capacitado.

TIEMPO

Se debe analizar cuanto tiempo se invertirá en la prueba; las determinaciones de control de calidad deben ser rápidas, mientras que en el área de investigación se necesitan pruebas más sofisticadas que requieren de más tiempo.

LOCALIZACIÓN

En la elección del equipo se debe tomar en cuenta dónde será colocado, ya que los instrumentos que se utilizan dentro de una planta deben resistir vapor, polvo, vibraciones y otro tipo de condiciones extremas de las plantas.

ELIMINACIÓN DE PRUEBAS INADECUADAS

Obviamente, los principios de algunas pruebas son inadecuados para ciertas muestras y deben ser eliminados, por ejemplo en galletas

nunca se debe llevar a cabo una prueba de extrusión, ya que éstas no fluyen.

SELECCIÓN PRELIMINAR

El siguiente paso es estrechar más el campo de opciones hacia los 2 o 3 métodos más prometedores. Es recomendable que se observe que tipo de principio tiene la prueba sensorial utilizada en la evaluación textural ya que puede proporcionar información valiosa. Por ejemplo, si la gente juzga la calidad textural presionando suavemente con la mano, se debe considerar una prueba que involucre un principio de deformación.

Los principios de las pruebas que se deben considerar son:

- Punción
- Deformación
- Extrusión
- Penetración
- Corte por cizallamiento
- Ruptura-doblado
- Viscosidad-consistencia
- Prensado
- Tensión
- TPA (Análisis de perfil de textura)

SELECCIÓN FINAL

En este punto el número de principios se ha reducido al mínimo y es momento de probar cada opción. Si el principio de una prueba no es adecuado después de varios intentos, se debe intentar con otro principio.

CONDICIONES DE PRUEBA

La etapa final es la estandarización de las condiciones de prueba, tales como el tamaño de la muestra, las dimensiones de la celda de

prueba, el rango de fuerzas, la velocidad de las partes móviles, la velocidad del graficador, la temperatura y otros factores.¹⁰⁹

¹⁰⁹ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

8. PRINCIPALES PARÁMETROS EN LOS DISTINTOS GRUPOS DE ALIMENTOS

8.1. FRUTAS Y VEGETALES

Año con año se desarrollan nuevas variedades de frutas y hortalizas. Los cultivadores y procesadores de frutas que se enfrentan con el reto de ganar y mantener una buena posición en el mercado en el sector, utilizan cada vez más métodos para investigar la calidad. Además el deseo del consumidor por nuevos productos y la competencia por proporcionar frutas de calidad ha estimulado los avances en las tecnologías de medición. Actualmente se cuenta con tecnologías que son capaces de identificar si una fruta es capaz de soportar el esfuerzo y la deformación del embalaje, el transporte y el proceso.

FRUTAS Y VEGETALES FRESCOS

La calidad de la fruta se basa en varios criterios que dependen del fin que tendrá la misma. La firmeza es un factor importante que hay que tomar en cuenta, ya que la mayoría, si no todas las frutas exhiben cambios sustanciales en su firmeza durante el proceso de maduración. Esta diferencia en la apariencia puede influir considerablemente en la aceptación del consumidor por el producto, así como en relación con la "madurez comestible" y la textura de la fruta. Desde el punto de vista del productor, es vital el poder medir las distintas etapas del proceso de maduración de manera precisa y compararlas con la textura de las distintas frutas. Tal información proporciona al procesador más control sobre el proveedor y permite el monitoreo de características texturales específicas.¹¹⁰

Los principales cambios en la textura de las frutas y vegetales ocurren después de la cosecha y se deben principalmente a una pérdida de humedad causada por la transpiración y la respiración del producto, que es un ser vivo que continúa con su proceso de maduración. La consecuencia más notable es la pérdida de turgencia en el producto. En la mayoría de los casos la pérdida de humedad se considera una disminución en la calidad. Por ejemplo, una lechuga que ha perdido firmeza en las hojas es rechazada por el consumidor, se le considera un producto que ha perdido su frescura. Existen varios métodos para evitar

¹¹⁰ <http://www.stablemicrosystems.com/apmjan99.htm>

esta pérdida de turgencia y conservar estos productos durante algunas semanas sin pérdidas de calidad importantes.

Algunas frutas se suavizan durante su proceso de maduración debido a la degradación de las sustancias pécticas. Por lo que en este tipo de frutas, como las manzanas, un producto suave ya está demasiado maduro, se trata de una fruta vieja que será rechazada por el consumidor.

Estos cambios fisiológicos de textura son de carácter irreversible y no se pueden detener. Sin embargo, el grado en el que estos procesos ocurren se puede controlar hasta cierto punto. Dependiendo del tipo de producto, se utilizan distintas técnicas como la refrigeración, el empaque a atmósfera modificada o la irradiación para controlar en cierto grado este proceso de maduración.¹¹¹

FRUTAS Y VEGETALES ENLATADOS

Mediante el procesamiento térmico se mata a las células vivas y consecuentemente se detienen los cambios fisiológicos de las frutas y los vegetales. La pérdida de turgencia es uno de los cambios de mayor importancia y no existe aún un método para conservar esta característica de textura tan deseable en los productos procesados.

Las frutas y vegetales enlatados conservan una gran cantidad de su valor nutritivo, sin embargo su textura es altamente modificada y criticada. La textura es la característica sensorial más severamente afectada durante el proceso de enlatado y la fruta frecuentemente se evalúa por el grado en que mantiene su integridad. Para permitir el control de las características de textura de la fruta es necesario monitorear las condiciones de la fruta, tiempos y grado de ruptura de la estructura, durante el procesamiento. Las pruebas de análisis de textura se pueden utilizar para diferenciar entre el éxito y los métodos alternativos para mantener la integridad o la firmeza de las frutas.

En los tejidos de las frutas y vegetales procesados térmicamente ocurren 4 efectos principales:

¹¹¹ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

- 1). El aire intracelular se expande y la mayoría escapa a través de los espacios intracelulares a través de las superficies cortadas (durante el blanqueo).
- 2). Al morir las células su membrana se hace permeable y permite el escape de líquido.
- 3). La pared celular se suaviza, provocando una pérdida de características crujientes y aumentando la deformabilidad.
- 4). Durante la cocción se pierde totalmente la pectina, por lo que el producto se suaviza considerablemente.

FRUTAS Y VEGETALES CONGELADOS

La congelación es uno de los métodos principales para la conservación de los alimentos. Se trata de un método subletal de preservación basado primeramente en el retardo del crecimiento microbiano y de las reacciones deteriorativas químicas y enzimáticas durante el almacenamiento a bajas temperaturas. Sin embargo, la congelación causa alteraciones en las características de textura, las cuales en algunos casos, como en el de los jitomates y la lechuga, son tan drásticas que el método resulta inapropiado. El mayor daño de la textura se debe a la distorsión física de las células y a la ruptura de la membrana celular por la presencia de cristales de hielo, con una consecuente pérdida de turgencia, y características crujientes al descongelar.

La congelación mata los tejidos vegetales, causando la inevitable pérdida de turgencia. Por lo tanto, los tejidos congelados y finalmente descongelados no pueden tener la textura túrgida y crujiente de los vegetales frescos. La congelación lenta fomenta la formación de cristales de hielo grandes que rompen las membranas celulares permitiendo la salida de líquido celular durante la descongelación, consecuentemente se obtiene un producto de consistencia seca, y textura gomosa. Mediante la congelación rápida se evita la formación de cristales tan grandes y por lo tanto esta deshidratación. Sin embargo, hasta la fecha, el propósito de los procesadores de frutas y vegetales es encontrar un método óptimo de congelación, el cual mantenga la integridad del alimento y que después de descongelar el producto éste se parezca lo más posible a un producto fresco.

FRUTAS Y VEGETALES DESHIDRATADOS

Las frutas frescas son el "snack" ideal, sin embargo, durante ciertas temporadas del año no se tiene acceso a ellas. Debido a lo anterior los "snacks" de frutas pueden ser la opción ideal, ya que son rápidamente comestibles; y no dejan residuos como la fruta fresca. Estos "snacks" son atractivos para la vista, la sensación bucal y la memoria. El consumo de este tipo de "snack" es un movimiento cultural positivo en busca de una existencia más saludable.

El secado de la fruta generalmente se necesita llevar a cabo donde ésta se cosecha, y sigue fresca. Existe una gran variación en las necesidades del procesamiento de diferentes frutas para lograr satisfacer los requerimientos de los distintos consumidores, de modo que prácticamente cada fruta que se seca requiere distintos ciclos de secado.

Mediante la deshidratación se provoca el encogimiento de los tejidos, la muerte de las células y considerables alteraciones en el citoplasma de las mismas, sin embargo la ruptura de las paredes celulares es mucho menor. La textura es tenaz y similar a la del cuero o dura y quebradiza. Mediante la rehidratación se obtiene una textura similar a la del producto fresco, sin embargo ésta es inferior. Debido a que las células de estos productos están muertas la turgencia se pierde por completo.

Las características de mayor importancia en una fruta seca son que ésta no sea demasiado tenaz o chiclosa y que no se quede pegada a los dientes.¹¹²

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

Las técnicas más comunes en la evaluación de frutas y vegetales se basan en la punción, deformación y extrusión.

1. Punción:

Es el método más utilizado y consiste en medir la fuerza máxima para penetrar con una probeta metálica (generalmente cilíndrica) hasta cierta profundidad dentro del producto.

¹¹² <http://www.stablemicrosystems.com/apmjan99.htm>

2. Extrusión-cizallamiento:

Se evalúa la fuerza necesaria para hacer que una muestra fluya a través de una abertura.

3. Deformación:

Mediante pruebas de deformación se determina la firmeza o la suavidad del producto, que se percibe al presionar suavemente una fruta o vegetal con la mano.¹¹³

8.2. PRODUCTOS DE PANIFICACIÓN Y PASTA

Las características que se evalúan en el pan, galletas, masa y pasta son distintas por lo que se ha desarrollado una gran cantidad de metodologías para la evaluación de las distintas características en estos productos.

PRODUCTOS DE PANIFICACIÓN

MASA DE PAN

Las propiedades reológicas de la masa son de gran importancia en el proceso de panificación, ya que determinan el comportamiento de la misma en las distintas etapas del proceso. Muchas de las características reológicas son el resultado de interacciones que surgen entre los ingredientes durante la fermentación o el mezclado. Los factores de mayor importancia sobre las características reológicas de la masa derivan del harina, el agua, la levadura y el aire, sin embargo existe una gran cantidad de ingredientes minoritarios, tales como acondicionadores de la masa, sales, grasas, enzimas y emulsificantes, que influyen en la reología de manera menos notoria.

El balance de las propiedades viscoelásticas de la masa es crítico durante el proceso de panificación. Si se tiene una masa demasiado viscosa, ésta fluirá demasiado durante esta etapa y no conservará la forma que se le dé. Además, si la masa es demasiado extensible, se obtendrá una masa demasiado larga para la etapa del moldeo. Si las propiedades elásticas son demasiado dominantes, será difícil redondear la masa y llevarla a la forma y tamaño deseados, además, la masa se encogerá y regresará a su tamaño original del laminado produciendo una

¹¹³ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

pieza que será demasiado corta para llenar completamente el molde (pan).

Las propiedades reológicas de la masa determinan la forma y el tamaño final que tendrá el pan. La forma deseada se obtiene cuando la pieza de masa se expande para llenar el molde, no cuando ésta fluye dentro del molde. Lo anterior implica que el comportamiento elástico debe ser el que predomina durante esta etapa. Si el comportamiento viscoso es el predominante, la masa fluye dentro del molde, llenando sus esquinas, dando como resultado una pieza de pan con bordes filosos y una superficie plana. De lo contrario, si la masa es demasiado elástica, ésta no se expandirá lo suficiente dentro del molde durante la fermentación o el horneado, y en este caso el producto final tendrá muy poco volumen y una forma similar a la pieza original de masa y no a la de una hogaza de pan.

La extensibilidad y la resistencia a la extensión de las masas de harina de trigo son valores físicos medibles, los cuales permiten una buena valoración del comportamiento durante el horneado bajo condiciones realistas. Generalmente los parámetros que se determinan son la fuerza máxima o resistencia a la extensión y la extensibilidad, que es la distancia a la cual se rebasa el límite elástico y se rompe la muestra.

Durante la fermentación y la primera etapa del horneado se producen burbujas en la masa, este hecho depende de las propiedades reológicas de la misma (esfuerzo, deformación y viscosidad).

La adhesividad es una característica de suma importancia durante las etapas de mezclado, división y redondeado. Una masa demasiado adhesiva no se separa adecuadamente de la mezcladora o del redondeador. Si por el contrario, la masa no es lo suficientemente adhesiva, no se puede formar adecuadamente por el redondeador y el producto resultante no tendrá la estructura deseada en la miga. Se necesita un grado adecuado de adhesividad durante las etapas de laminado y moldeado para que las capas de masa se mantengan unidas entre sí y de este modo se evitan hoyos grandes en el producto final horneado.

La adhesividad excesiva de la masa puede ser un gran problema en el horneado, causando varias horas de "down time" si no se controla.

Muchos factores, tales como el sobreamasado, una adición excesiva de agua, la extracción de harina, y diferencias en la composición de las proteínas y actividad de enzimas proteolíticas pueden causar este problema.¹¹⁴

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

La deformación y el flujo de la masa son un fenómeno tan complejo, que no se puede evaluar en simples términos físicos, por lo que se utilizan métodos empíricos.

Las técnicas más comunes en la evaluación de la masa de harina de trigo se basan en los principios de mezclado, extensión, extrusión, expansión, y viscosidad.

1. Mezclado:

El mezclado es una de las etapas del proceso de panificación y se evalúa empíricamente. Mediante este tipo de determinaciones de mezclado se mide la torsión con respecto a la fuerza aplicada, la resistencia al mezclado, la plasticidad y la movilidad de la masa durante el mezclado, y la resistencia de la masa hacia las aspas.

2. Extensión:

En las nuevas tecnologías de panificación la masa se somete a grandes elongaciones, por lo que se determina que tanto se puede estirar la masa y la energía que se necesita para que ésta se rompa por estiramiento.

3. Extrusión:

En las nuevas tecnologías la masa se extruye directamente al molde. La masa se hincha debido a la extrusión, según sus propiedades elásticas, por lo tanto los factores que aumentan la elasticidad hacen lo mismo con el hinchamiento por extrusión. El grado de extrusión se ve influido por la consistencia de la masa y por lo tanto su contenido de agua. Mediante este tipo de prueba se determina el contenido de agua que necesita una harina para la preparación de una masa.

¹¹⁴ <http://stablemicrosystems.com/apmnov98.htm>

4. Expansión:

Se miden los cambios en el volumen de la masa durante la fermentación y el horneado con distintos equipos.

5. Viscosidad:

La disminución de la viscosidad de una solución de harina indica la actividad enzimática de la α -amilasa.¹¹⁵

PAN

En el pan se evalúan la firmeza, la adhesividad, la cohesividad y la capacidad de recuperación elástica, sin embargo la firmeza es la característica de mayor relevancia debido a que existe una gran correlación entre la firmeza de la miga y la percepción que tiene el consumidor de la frescura del pan blanco de caja.

El envejecimiento del pan ocurre debido a un incremento en la cristalinidad del almidón. El envejecimiento del pan se debe a la retrogradación del almidón y modificaciones en el gluten, las cuales causan un incremento de humedad lábil dentro de la estructura. La absorción de esta humedad libre por parte del almidón cristalizado tiene un efecto parcial de suavizado en los gránulos de almidón. También ocurren cambios a nivel macroscópico en la textura del pan: la humedad migra del centro de la miga hacia la periferia de la pieza de pan, lo cual causa cambios notables, especialmente durante el enfriamiento.

Es bien sabido que el pan viejo y duro se puede "refrescar" mediante el horneado, sin embargo, debido a que últimamente el consumidor recalienta el pan en el horno de microondas, éste se vuelve rígido y difícil de masticar, por lo que se ha puesto más atención en la evaluación de propiedades como la elasticidad y la firmeza de la miga cuando ésta se rompe.

Se ha estudiado el efecto de algunos surfactantes, el uso de distintos tipos de harina y de nuevas enzimas, el efecto de la variedad de trigo, las condiciones del proceso y la adición de otros ingredientes con el objetivo de retardar el endurecimiento del pan.

¹¹⁵ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

1. **Resistencia a la deformación:**
Se obtienen resultados relativos a la firmeza del pan.
2. **Distancia penetrada:**
Se mide la distancia que penetra un penetrómetro en un tiempo determinado con una carga constante. Los resultados de firmeza que se obtienen mediante estas pruebas no son idénticos. Este método tiene una mayor correlación con la evaluación sensorial, y por lo tanto es el más utilizado.
3. **Compresión Repetida:**
Mediante compresiones repetidas de la misma muestra se mide la adhesividad de la muestra, determinando la fuerza negativa que se genera al retirar la probeta de la muestra, y la cohesividad mediante el coeficiente de la primera fuerza de compresión y la segunda.
4. **Compresión-Descompresión:**
Mediante compresión y la relajación se determina la capacidad de recuperación elástica del pan (característica que se va perdiendo con el envejecimiento).¹¹⁶

GALLETAS

Es bien sabido que las galletas se elaboran homeando una pieza húmeda de masa hasta que ésta adquiere un color dorado adecuado y se seca. Durante el horneado el volumen de la pieza de masa aumenta debido al leudado. Si el horneado no es suficiente, la humedad no se elimina suficientemente de la galleta y ésta tendrá una textura similar a la de un pastel.

Lo deseable en la mayoría de las galletas es que sean crujientes y esto solamente se logra cuando el contenido de humedad es bajo; en las galletas tipo María el contenido de humedad es menor al 2% y en las galletas suaves es menor al 4%.

Las galletas absorben humedad del medio ambiente, por lo que pierden sus atributos crujientes y se vuelven suaves; las galletas

¹¹⁶ <http://stablemicrosystems.com/apmnov98.htm>

envejecen y ya no son satisfactorias para su consumo. La dureza y la fracturabilidad son parámetros de gran importancia, ya que son indicadores de frescura en las galletas.

Los ingredientes también influyen considerablemente en la textura de las galletas, los tres principales son harina, grasa y azúcar. La firmeza de la masa de las galletas se puede alterar considerablemente por el cambio de cualquiera de los tres ingredientes principales, lo cual se puede utilizar como herramienta de predicción en los productos horneados.

Algunas galletas tienen relleno de mermelada o jalea de fruta, cuyo contenido de humedad es aproximadamente de un 15%, por lo que el contenido de humedad en la galleta aumenta. Se debe tener en cuenta este fenómeno cuando se añade este tipo de relleno a las galletas crujientes.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

- 1. Penetración:**
Mediante una prueba triple de penetración se determina la firmeza de la masa.
- 2. Fuerza de ruptura transversal:**
es un indicador de la dureza y la fracturabilidad de las galletas. Conforme disminuye el contenido de humedad, el producto se torna más quebradizo.

PASTA

El término pasta abarca una gran variedad de productos dentro de los cuales los más comunes son los macarrones, el espagueti y los noodles de huevo. Dentro de los parámetros que se evalúan en este tipo de productos se tienen el color, la apariencia, el comportamiento ante la cocción (absorción de agua y pérdida de sólidos) y particularmente las propiedades del producto cocido y antes de cocerse.

PASTA NO COCIDA

En el caso del producto no cocido las características mecánicas son muy importantes principalmente con respecto al empaque y al

transporte, debido a que puede haber grandes pérdidas por ruptura del producto..

En la producción comercial de pasta se utiliza semolina de trigo durum, harina de trigo durum y harina de trigo duro. La calidad de las pastas no solamente depende de la calidad de uno o varios ingredientes, los métodos de procesamiento son muy importantes y definitivos en la calidad del producto terminado. En el proceso se mezcla la semolina con el agua y esta mezcla se alimenta a un extrusor donde se amasa y se transforma en una masa tiesa (debido a las interacciones del gluten). La cámara de mezclado y el extrusor se mantienen al vacío para eliminar el aire atrapado en la masa, con lo que se evita la formación de pequeñas burbujas en el producto final, las cuales causan una apariencia cretosa y disminución en la fuerza mecánica del producto. Finalmente se fuerza al material a través de un dado. Después de la extrusión, la pasta se seca desde un 31% hasta un 10 - 12% de humedad, este es el paso más crítico en la elaboración de la pasta, la velocidad de secado es vital. Si la pasta se seca demasiado rápido, el producto será muy poco flexible, además se crean gradientes de humedad, los cuales provocan la formación de grietas en la pasta. Esto puede ocurrir durante el ciclo de secado e incluso varias semanas después, ya que el producto haya sido empacado y probablemente vendido, creando una mala imagen en el consumidor. Por el contrario, si el proceso de secado es muy lento los microorganismos proliferan en el producto.¹¹⁷

La superficie de la pasta recién extraída está formada por una película continua de proteína, mientras que la porción interna es una estructura compacta de gránulos de almidón embebidos en una matriz amorfa de proteína alineada en capas paralelas a la película exterior de proteína.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

Las evaluaciones más comunes para pasta no cocida se basan principalmente en los siguientes principios:

- 1. Fuerza de ruptura transversal:**
Es un indicador de la resistencia a la ruptura de la pasta no cocida.

¹¹⁷ <http://www.stablemicrosystems.com/apmfeb00.htm>

2. **Compresión transversal:**

Es un índice de la flexibilidad de la pasta no cocida.

PASTA COCIDA

En el caso de las pastas cocidas, las características de mayor importancia son la firmeza, la gomosidad, y la elasticidad.

Durante la cocción de las pastas de trigo durum la gelatinización del almidón y la coagulación de las proteínas causan grandes cambios estructurales que influyen en la textura final. Durante la cocción la proteína de la pasta de buena calidad absorbe agua y se hincha más rápidamente que el almidón. En pastas de baja calidad las proteínas se aglomeran, sin hidratarse completamente. Es importante que la hidratación de las proteínas de la pasta ocurra antes que la gelatinización del almidón para producir pastas cocidas de buena calidad. Si se desintgran los gránulos de almidón por cocción en cantidad excesiva de agua la matriz proteínica se desorganiza, causando cambios en la estructura de la superficie de la pasta. El estado del almidón y la estructura de la superficie contribuyen al desarrollo de una textura elástica y una adhesividad particular de la pasta.¹¹⁸

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

Los métodos de evaluación de pasta cocida son más utilizados que los de pasta no cocida, debido a que el consumidor evalúa el producto generalmente durante su cocción. Se han desarrollado varios métodos instrumentales que evalúan factores como elasticidad, firmeza, adhesividad de la superficie¹¹⁹

1. **Compresión:**

Al comprimir 5 tiras de espagueti se determina la firmeza del producto. Al retirar la probeta se obtiene una fuerza negativa que representa la adhesividad de la pasta. Mediante este tipo de prueba se determina la tolerancia a la cocción.

¹¹⁸ Smewing, J. American Association of Cereal Chemists, Inc. Analyzing the Texture of Pasta for Quality Control

¹¹⁹ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

2. Tensión:

Se determina la fuerza máxima para la ruptura de la pasta como índice de resistencia, y la distancia para la ruptura indica la elasticidad de la muestra.

3. Corte:

Se determina la terneza mediante una cuchilla o un equipo simulador de la mordida.¹²⁰

8.3. CÁRNICOS

La carne es un alimento que además de tener un elevado grado nutricional tiene una gran aceptación universal debido a su color, sabor y jugosidad. Las investigaciones de mercado indican que la terneza de la carne es una propiedad crucial para su aceptación por parte del consumidor.

Originalmente, la textura de la carne únicamente se definía en términos de firmeza de las fibras musculares, ya que la estructura de los fascículos se relaciona de manera directa con la calidad. La terneza, sin embargo implica una evaluación sensorial y por lo tanto se debe determinar organolépticamente mediante características como la jugosidad, la facilidad de penetración del diente y la cantidad residual después de la masticación.

La textura de la carne es una función de su estructura y composición. La carne es el alimento de organización estructural más compleja y por lo tanto la interpretación de resultados es muy difícil y confusa. Además los músculos varían en su composición y estructura dentro de las más de 300 unidades anatómicas de la musculatura de las 3 especies domésticas.

La textura de la carne se ve afectada por factores antemortem (sexo, raza, alimentación, transporte y reposo antes de la ejecución del animal) y postmortem (velocidad de enfriamiento de la canal, humedad relativa en las cámaras de refrigeración y tipo de refrigeración).

Actualmente existe una gran variedad de productos cárnicos procesados como patés, jamones y salchichas, para los cuales se busca

¹²⁰ <http://www.stablemicrosystems.com/apmfeb99.htm>

encontrar combinaciones ideales de ingredientes, evaluando su contribución en los métodos y tiempos. Las características de mayor importancia en la industria de proceso para cárnicos son firmeza, rebanabilidad y terneza.¹²¹

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

Se ha desarrollado una gran cantidad de metodologías para la evaluación instrumental de la textura de la carne, siendo las empíricas las más exitosas.

1. **Corte:**
Se mide la fuerza necesaria para el corte o cizallamiento de una muestra, mediante una o varias cuchillas.
2. **Tensión:**
Se determinan la fuerza máxima requerida para la ruptura de la muestra de carne o producto cárnico procesado como índice de elasticidad de la muestra, por medio de elongación.
3. **Torsión:**
Se determina la terneza mediante el estudio de la deformación por torsión de la carne.
4. **Extrusión:**
Se mide la facilidad con la que se untan las pastas cárnicas.

8.4. LÁCTEOS

El término de productos lácteos abarca una gran gama de productos derivados de la leche como la mantequilla, el queso, el helado y el yogurt. La mayoría de los productos lácteos son emulsiones, incluso el queso procesado puede considerarse como una suspensión O/W estabilizada mediante caseína hidratada y emulsificantes, la excepción es el queso natural.

¹²¹ <http://www.stablemicrosystems.com/apmdec98.htm>

LECHE

La leche normal promedio contiene aproximadamente un 12.5% de materia seca, de los cuales el 3.5% es grasa, el 4.7% es lactosa y el 4% es proteína (75% caseína). La leche tiene un comportamiento de flujo casi Newtoniano y su viscosidad es el doble a la del agua, se comporta de manera similar, sin embargo su comportamiento depende de la temperatura, el grado de dispersión de sus componentes y el volumen de las partículas coloidales.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

1. Cizallamiento Simple:

Se mide la viscosidad, es decir, el grado de flujo por unidad de fuerza aplicada, es la fuerza necesaria para hacer fluir el líquido.

CREMA

La estructura de la crema es muy similar a la de la leche, la única diferencia es que la crema tiene un contenido de grasa mucho más elevado, pudiendo ser hasta de un 50% en peso. Debido al elevado contenido de grasa de la crema existe una mayor interacción entre los glóbulos, lo cual se refleja en un comportamiento de flujo No-Newtoniano.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

1. Cizallamiento Oscilatorio:

Se mide la viscosidad dinámica del producto.

MANTEQUILLA

La mantequilla se obtiene a partir de la crema mediante agitación vigorosa en la que se separan los glóbulos sólidos de grasa para formar cristales que van incrementando su tamaño para dispersarse en una fase continua. Se drena el exceso de humedad y los glóbulos líquidos de grasa junto con el agua sobrante y un poco de aire.

La textura de la mantequilla es esencial en su calidad, determina la untabilidad e influye fuertemente en su aspecto, sabor, sensación bucal y los usos que se le pueden dar a la misma.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

- 1. Punción:**
Se mide la fuerza máxima para penetrar con una probeta metálica cónica hasta cierta profundidad dentro del producto.
- 2. Extrusión:**
Se mide la facilidad con la que se unta la mantequilla.
- 3. Cizallamiento Simple:**
Se determinan parámetros viscoelásticos.

QUESO

El queso natural, contiene agua, grasa y proteína en cantidades aproximadamente iguales; la proteína (principalmente caseína) es la que contribuye principalmente a la estructura del queso maduro. La caseína se encuentra en forma de micelas dentro de la leche y durante la renetización ésta cambia su estructura de micelas a filamentos y durante la maduración, esta estructura se transforma en una red tridimensional. Las principales características texturales que se evalúan en el queso son dureza, recuperación elástica, suavidad, granulosis y firmeza.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

- 1. Punción:**
La firmeza del queso se determina mediante por punción con una probeta cónica.
- 2. Corte:**
La dureza se determina cortando la muestra con un alambre.
- 3. Cizallamiento Simple:**
Se determinan parámetros viscoelásticos, por ejemplo mediante un viscoelastómetro de placas paralelas.

HELADO

El helado es una emulsión *O/W* estabilizada por la proteína de la leche y emulsificantes, hidrocoloides y otros aditivos. La fase acuosa contiene una elevada concentración de azúcar y muy bajas cantidades de electrolitos. La fase oleosa se encuentra cristalizada, al igual que la fase acuosa. Dentro de la emulsión semicongelada hay aire incorporado. El helado se endurece durante el almacenamiento, ya que la temperatura es menor que la temperatura de procesamiento.

El helado congelado es básicamente una espuma en la cual el aire incorporado ocupa mínimo un 50% del volumen total (el over-run es mayor a un 100%) El líquido de las capas que se encuentran entre las celdas de aire es mucho más denso que el de las espumas clásicas. Los cristales de grasa y de hielo se encuentran dentro de las capas líquidas, y adicionalmente, las celdas de aire están rodeadas por algunas partículas de grasa. Los cristales de hielo son mucho mayores que las partículas de grasa, las cuales están rodeadas por micelas de caseína, y su capa externa está compuesta principalmente por la parte grasa que se derrite más fácilmente. Esto es de importancia para el análisis del comportamiento de derretido y la evaluación sensorial de las características de textura. Hasta un 75% del agua se convierte en hielo cuando se congela la mezcla de helado, de modo que la fase acuosa remanente no congelada es una solución de azúcar, hidrocoloides, estabilizantes, electrolitos, etc. relativamente concentrada y muy viscosa

Las características de textural del helado se determinan hasta cierto punto por el tamaño de sus cristales, el cual se puede reducir bajando la temperatura del congelador. Los cristales pequeños imparten suavidad al helado, y los cristales grandes provocan una sensación arenosa y "hielosa". La grasa en el helado contribuye a la sensación de suavidad en el paladar, ya que impide el crecimiento de los cristales de hielo mediante obstrucción mecánica y además actúa como lubricante en la boca.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

- 1. Punción:**
Mediante la punción con una probeta cónica se determina la viscosidad aparente del helado.

2. **Corte:**
El helado se corta con un alambre para determinar el punto de rendimiento.
3. **Cizallamiento Simple:**
Determinación de parámetros viscoelásticos.
4. **Compresión-Descompresión:**
Mediante compresión y relajación se determina la capacidad de recuperación elástica.¹²²

YOGURT

El yogurt es un producto fermentado con características intermedias entre las de las leches cultivadas comunes y las de los quesos suaves. Su textura es variable, va desde la textura de pudín hasta la de un líquido cremoso muy viscoso. En los distintos países se prefieren distintas consistencias en el yogurt. Por lo general, los alemanes prefieren un yogurt muy espeso, los holandeses un poco espeso, mientras que los ingleses lo prefieren ligero y suave. Los términos que se utilizan para la descripción de la consistencia del yogurt son firmeza, cremosidad, y viscosidad. Las características indeseables en el yogurt son la grumosidad y la granulosis, principalmente.

Al igual que en otros alimentos, en el yogurt hay una tendencia al consumo de productos bajos en grasa, sin embargo, la consistencia de éstos es mucho más ligera y con menos cuerpo que las de un yogurt normal. Debido a lo anterior, los productores ajustan sus formulaciones para obtener la textura de un producto rico en grasa, mediante el uso de espesantes en productos bajos en grasa.¹²³

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

1. **Penetración:**
Mediante este tipo de prueba se miden la viscosidad y la firmeza del yogurt.
2. **Cizallamiento:**

¹²² DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

¹²³ <http://www.stablemicrosystems.com/apmjun99.htm>

Se utilizan pruebas de cizallamiento y torsión para determinar la viscosidad del yogurt, ya que es un fluido No-Newtoniano.

8.5. CORRELACIÓN ENTRE MÉTODOS SENSORIALES E INSTRUMENTALES

8.5.1. PSICOFÍSICA

El conocimiento que se tiene de las propiedades físicas y reológicas está basado en una serie de consideraciones por parte del observador humano a la par de instrumentos. Los mecanismos humanos del sistema cinético-sensorial, aún no han sido interpretados del todo, sin embargo es indispensable que se entienda como se lleva a cabo la transformación de información física a cinética para que sea posible el entendimiento de cómo respondemos a las propiedades mecánicas de los materiales.

Se han hecho muchos estudios sobre la percepción de los movimientos y de cómo las propiedades específicas de los materiales pueden contribuir a nuestra percepción de dureza, elasticidad, viscosidad, etc.¹²⁴

La evaluación sensorial de la textura de los alimentos pertenece al dominio de la psicofísica. La psicofísica estudia la correlación de la experiencia sensorial con mediciones físicas. El objetivo principal es establecer ecuaciones matemáticas o relaciones que permitan al científico predecir las características sensoriales partiendo de mediciones físicas, y viceversa. La psicofísica no busca explicar la base de las sensaciones, sin embargo busca relaciones entre lo sensorial y lo físico. Por lo tanto la psicofísica tiene dos objetivos: la descripción de características físicas de materiales que están implícitas en la percepción de la textura y un análisis de las correlaciones sensorial-instrumental para relacionar una o más características físicas a la percepción experimentada por el humano.¹²⁵

Con la aplicación de la psicofísica se establece que tan estrecha es la correlación entre determinaciones instrumentales y sensoriales, por lo que antes de sustituir una técnica sensorial por una instrumental, es

¹²⁴ DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality

¹²⁵ Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods

necesario llevar a cabo un estudio de la correlación que existe entre la prueba instrumental y la sensorial, de lo contrario se puede llegar a resultados falsos.

La correlación de mediciones sensoriales e instrumentales es compleja. En esta aplicación se divide a la evaluación sensorial en dos clases:

1. La evaluación sensorial que emplea escalas de intensidad, lo que implica qué tanto se encuentra una propiedad dentro del material de prueba. Para esta escala existe una relación directa entre el resultado sensorial y la medición instrumental dentro de los límites de sensibilidad del panel de jueces.
2. La evaluación sensorial que emplea escalas de aceptación, es decir qué tanto les gusta el alimento a las personas. Esta escala por lo general tiene forma de U invertida cuando se grafica contra una escala instrumental.

8.5.2. MODELOS PSICOFÍSICOS DE CORRELACIÓN

La correlación entre una escala de intensidad y una medición instrumental puede explicarse mediante tres modelos psicofísicos.

1. Modelo lineal: existe una relación lineal entre el estímulo (medición instrumental) y la respuesta sensorial medida.
2. Modelo de Weber-Fechner: existe una relación semilogarítmica entre la respuesta sensorial y el logaritmo del estímulo.
3. Modelo de "Power": es una relación logaritmo - logaritmo.

Cada uno de estos modelos ha sido aplicado exitosamente a ciertos sistemas. Después de un debate entre psicólogos se llegó al acuerdo de que el modelo de Power es el más apropiado, ya que describe de manera más satisfactoria la mayoría de los casos que se presentan. En otras palabras una gráfica del logaritmo de una

determinación instrumental versus el logaritmo de la determinación sensorial será lineal en la mayoría de los casos.¹²⁶

8.5.3. EJEMPLOS DE CORRELACIÓN ENTRE MÉTODOS SENSORIALES E INSTRUMENTALES

COMPARACIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y MECÁNICAS EMITIDAS POR PRODUCTOS CRUJIENTES

Se llevó a cabo una comparación de las señales acústicas y mecánicas emitidas por crutones y bolas de queso crujientes con distinto contenido de humedad. Las muestras se sometieron a una prueba de compresión y se registraron las emisiones acústicas en un disco compacto. Se obtuvo una correlación estrecha entre los parámetros acústico y mecánico.¹²⁷

ANÁLISIS SENSORIAL E INSTRUMENTAL EN MANZANAS FRESCAS

En Noruega se llevaron a cabo análisis sensorial e instrumental de textura y compuestos volátiles en manzanas y se compararon los resultados obtenidos. Se obtuvo una buena correlación entre los atributos sensoriales de olor y sabor con textura y compuestos volátiles evaluados simultáneamente.¹²⁸

RELACIÓN ENTRE ANÁLISIS SENSORIAL E INSTRUMENTAL DE PROPIEDADES REOLÓGICAS EN YOGURT

Se llevó a cabo una evaluación de características sensoriales y reológicas en yogurt batido producido a distintas temperaturas de fermentación, tratamiento térmico, contenido de sólidos y distinto cultivo de bacterias. Se obtuvieron correlaciones relativamente estrechas ($r > 0.8$).¹²⁹

¹²⁶ Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement

¹²⁷ Tesch, R. et al., Comparison of the Acoustic and Mechanical Signatures of Two Crunchy Cereal Foods at Various Water Activity Levels

¹²⁸ Karlsten, A.M. et al., Instrumental and Sensory Analysis of Fresh Norwegian and Imported Apples

¹²⁹ Skriver, A. et al., Relation between Sensory Texture Analysis and Rheological Properties of Stirred Yogurt

RELACIÓN ENTRE ATRIBUTOS DE TEXTURA SENSORIALES E INSTRUMENTALES EN ARROZ COCIDO

Se determinaron sensorial e instrumentalmente los atributos de textura del arroz cocido. La correlación entre los atributos sensoriales e instrumentales llevados a cabo con la metodología del TPA fue muy débil.¹³⁰

ANÁLISIS DESCRIPTIVO E INSTRUMENTAL DE JITOMATES PROCESADOS

Se analizaron distintos procesos para dos variantes de jitomates y se obtuvo que el análisis descriptivo proporcionó una mejor descripción de la textura del producto, sin embargo la firmeza sensorial presentó una gran correlación con la instrumental.¹³¹

CARACTERIZACIÓN INSTRUMENTAL Y SENSORIAL DE TEXTURA EN PAPAS COCIDAS

Se llevó a cabo una comparación entre compresión uniaxial, TPA y determinaciones químicas con análisis sensorial para la determinación de la calidad textural de papas cocidas. Se obtuvo que hay una correlación estrecha entre la prueba de compresión y el TPA. Se obtuvo un coeficiente de correlación entre los datos predichos instrumentalmente y el análisis sensorial de un 0.36 a 0.79 para los atributos de esfuerzo, deformación y módulo de deformación.¹³²

RELACIÓN ENTRE ANÁLISIS INSTRUMENTAL Y SENSORIAL DE TEXTURA DE PAPAS FRITAS

Se llevó a cabo una evaluación sensorial de la textura de papas fritas comerciales, así como una evaluación instrumental. La evaluación instrumental constó de una prueba instrumental de punción con un Instron determinando fuerza de fractura, deformación y tiesura. El análisis sensorial se llevó a cabo con un panel de jueces entrenados en

¹³⁰ Lyon, B.G. et al., Sensory and Instrumental Relationships of Texture of Cooked Rice from Selected Cultivars and Postharvest Handling Practices

¹³¹ Lee, S. Y. et al., Relating Descriptive Analysis and Instrumental Texture Data of Processed Diced Tomatoes

¹³² Thybo, A. y Martens, M., Instrumental and Sensory Characterization of Cooked Potato Texture

la evaluación de papas fritas. Los atributos de textura sensoriales fueron dureza, masticabilidad, crujido y terneza. El análisis factorial de atributos sensoriales indicó que la textura se puede dividir en 2 componentes principales, el primero representado por dureza, características crujientes y masticabilidad y el segundo solamente por terneza. Mediante análisis discriminativo se obtuvo que la terneza y el crujido de la muestra podían predecir correctamente más de un 90% de los datos. La fuerza de fractura se correlacionó bien con todos los atributos sensoriales (>0.76). La terneza fue el atributo sensorial con la mayor correlación (0.95) con respecto a la fuerza de fractura.¹³³

DETERMINACIONES MECÁNICAS Y SENSORIALES EN PRODUCTOS CRUJIENTES

Se compararon datos mecánicos y sensoriales en cereales con un bajo contenido de humedad. Se prepararon las mezclas por extrusión y se sometieron a pruebas de punción. También se llevaron a cabo evaluaciones sensoriales de fracturabilidad y dureza durante la primera mordida. Los resultados indicaron que el análisis fractal de la curva de fuerza-deformación puede ser un método adecuado para sustituir el análisis sensorial.¹³⁴

Como se puede concluir por lo anteriormente descrito, no todas las metodologías instrumentales tienen una buena correlación con la evaluación sensorial. Por lo que es necesario analizar la existencia y magnitud de la correlación antes de hacer cualquier tipo de predicción o sustitución de metodología.

¹³³ Segnini, S. et al., Relationship between Instrumental and Sensory Analysis of Texture and Color of Potato Chips

¹³⁴ Valles, P.B, et al. Understanding of how Moisture Cereal Products: Mechanical and Sensory Measurements of Crispness

9. CONCLUSIONES

Los objetivos de este trabajo se cumplieron, ya que se logró llevar a cabo una revisión bibliográfica de metodologías instrumentales actualizadas para la evaluación de características reológicas de los alimentos.

Debido a que en la actualidad los consumidores tienen una mayor conciencia en la percepción de la textura de los alimentos se está invirtiendo más en análisis de textura y sobre todo en nuevas metodologías instrumentales con el fin de obtener resultados más precisos y de manera más rápida. Un reflejo de lo anterior es la gran gama de equipos que se han ido desarrollando, desde los más versátiles hasta los más específicos.

Para el desarrollo de los equipos de evaluación de textura es necesario conocer el proceso de elaboración y las características del producto en cada una de las etapas que pasa. Lo mismo es válido desde que el alimento es tocado por el consumidor hasta que se destruye dentro de la boca. El conocimiento profundo de estos procesos ha permitido el desarrollo de instrumentos imitativos en la evaluación textural instrumental.

El uso de equipos universales es una tendencia creciente debido a su versatilidad, flexibilidad y diseño. Por otro lado existe una gran gama de equipos especializados para distintos tipos de aplicaciones por lo que para cada determinación existe un instrumento hecho prácticamente a la medida. Aunque los equipos universales ofrecen gran flexibilidad, no en todos los casos es necesario contar con ellos. Dependiendo del tipo de industria en cuestión y del número de productos distintos que elabore la misma se debe hacer la elección de este equipo, ya que si solamente se maneja un tipo de producto no es necesario contar con un equipo muy versátil y es suficiente con tener con uno específico. Otro punto que se debe considerar es el análisis minucioso de si es necesario invertir en este tipo de equipo, ya que son instrumentos muy caros que deben explotarse al máximo ya una vez adquiridos.

Es importante saber que tan estrecha es la correlación que existe entre las pruebas instrumentales y las sensoriales, ya que si existe mucha relación, ambos métodos pueden ser intercambiables entre sí, es

decir que se pueden predecir características sensoriales mediante una evaluación instrumental, la cual se lleva a cabo de manera más rápida y sencilla. Existen varios modelos para determinar que tan estrecha es la relación entre las determinaciones sensoriales e instrumentales: el modelo lineal, el semilogarítmico y el logaritmo-logaritmo, de los cuales el logaritmo-logaritmo resulta ser el más eficiente en la mayoría de los casos. Sin embargo cada caso es especial y se debe analizar cuidadosamente.

El uso de metodologías instrumentales es una herramienta muy útil, sin embargo no se debe olvidar que no se trata de una metodología que pueda sustituir a la evaluación sensorial. Los instrumentos arrojan resultados precisos y repetibles, sin embargo estos parámetros son datos totalmente aislados, en cambio, la evaluación sensorial proporciona datos exactos, es decir, valores verdaderos, apreciativos, tal y como perciben las personas; presenta señales múltiples y más complejas. La decisión final respecto a los productos la tienen los consumidores, ya que se puede utilizar la mejor tecnología pero a quien el producto debe satisfacer finalmente es al consumidor. Sin embargo, para determinaciones de calidad de rutina, la evaluación instrumental puede ser la mejor opción, debido a que se necesita obtener resultados rápidamente de manera precisa y confiable. En este punto, la evaluación sensorial es más lenta y además los jueces se pueden saturar, por lo que en casos como este, la evaluación instrumental puede sustituir a la sensorial, más no sin antes haber establecido una buena correlación con los resultados que se obtendrían mediante la evaluación sensorial.

Producto	Característica	Parámetro	Principio de la Prueba	Tipo de Celda				
				Cizallamiento - Combinación Universal	Cizalla Ingeniería	Penetración	Otra	
Lácteos	Leche	Viscosidad	Grado de flujo por unidad de fuerza	Cizallamiento simple				viscosímetro de cilindros coaxiales
	yogurt	Consistencia	Fuerza máxima	Extrusión		X		Extrusión
		Consistencia	Fuerza máxima	Retroextrusión		X		Retroextrusión
		Viscosidad	Grado de flujo por unidad de fuerza	Cizallamiento simple				Viscosímetro de cilindros coaxiales
	Queso Maduro	Firmeza	Punto de rendimiento	Punción		X	X	
		Adhesividad	Fuerza máxima	Punción-retracción		X	X	
		Viscoelasticidad	Grado de deformación por unidad de fuerza	Compresión				Viscoelastómetro de placas paralelas
	Queso Procesado	Elasticidad	Módulo de elasticidad dinámica	Compresión				Viscoelastómetro dinámico
		Viscosidad de flujo continuo	Grado de flujo por unidad de fuerza	Cizallamiento sencillo				Viscosímetro de cono y plato
		Viscoelasticidad	Grado de deformación por unidad de fuerza	Compresión				Platos paralelos de compresión
		Punto de rendimiento	Fuerza máxima	Punción		X	X	
		Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X		
	Queso Fresco	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X		
	Queso Cottage	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X		
	Queso Crema	Untiabilidad	Fuerza máxima-grado de flujo	Extrusión		X		Extrusión
		Dureza/Suavidad	Fuerza máxima	Corte		X	X	Corte con un alambre
		Viscosidad estática	Grado de flujo por unidad de fuerza	Cizallamiento		X		Viscosímetro de placa y cono
	Crema	Viscosidad dinámica	Grado de flujo por unidad de fuerza	Cizallamiento oscilatorio				Viscosímetro de cilindros coaxiales
	Mantequilla	Untiabilidad	Fuerza máxima-grado de flujo	Extrusión		X		Extrusión
		Dureza/Suavidad	Fuerza máxima	Corte		X	X	Corte con un alambre
Viscosidad estática		Grado de flujo por unidad de fuerza	Cizallamiento		X		Viscosímetro de placa y cono	
Helado (congelado)	Punto de rendimiento	Fuerza máxima	Punción		X	X		
	Viscoelasticidad	Grado de deformación por unidad de fuerza	Cizallamiento				Viscoelastómetro de placas paralelas	
Helado (ablandado)	Viscoelasticidad	Grado de deformación o flujo por unidad de fuerza	Arrastra y flexibilidad				Viscosímetro de cilindros coaxiales	

Producto	Característica	Parámetro	Principio de la Prueba	Tipo de Celda				
				Calentamiento - Completación	Universal	Cuchilla Individual	Penetración	Otra
Cárnicos	Carne de res	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Carne de cordero	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Carne de cerdo	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Carne de conejo	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Jamón	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Elasticidad	Fuerza máxima	Resistencia a la tensión		X		Extensión y elasticidad
		Elasticidad de rebanadas finas	Fuerza máxima	Resistencia a la tensión		X		Extensión y elasticidad
	Pollo	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Pavo	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Salchichas	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
		Elasticidad	Fuerza máxima	Resistencia a la tensión		X		Tensión y elasticidad
	Palé	Unhiabilidad	Fuerza máxima	Corte		X	X	
		Unhiabilidad	Fuerza máxima-grado de flujo	Extrusión		X		Extrusión
		Firmeza	Fuerza máxima	Punción		X	X	
		Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Corte		X	X	Corte con un alambre
	Pescado	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X	
Sushi	Firmeza	Fuerza máxima	Corte		X	X		
	Elasticidad	Fuerza máxima	Resistencia a la tensión		X		Tensión y elasticidad	
	Fuerza del gel	Fuerza máxima	Punción		X	X		
Alm. etalado	Temeza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X				
	Retención de humedad	Líquido exprimido	Compresión	X	X		Suculometro	

	Producto	Característica	Parámetro	Principio de la Prueba	Tipo de Celda			
					Comprimiento - Completación Universal	Cuchilla Individual	Penetración	Otra
Frutas y Legumbres	Manzanas	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Punto de rendimiento	Fuerza máxima	Punción		X	X	
	Ciltricos	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
	Acelunas	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
	Duraznos	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Punto de rendimiento	Fuerza máxima	Punción		X	X	
	Fresas	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Cohesividad	Fuerza máxima	Compresión		X		
		Adhesividad	Fuerza máxima	Compresión-retracción		X		Compresión
	Espárragos	Tenacidad	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Brócoli	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Tenacidad	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Ejotes	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Tenacidad	Fuerza máxima	Corte		X	X	
	Zanahonas	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
	Berenjena	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
	Cebollas	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
	Chicharos	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
		Firmeza	Fuerza máxima	Punción		X		X
	Pimientos	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X		
Almaites	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-ozallamiento	X	X			

Producto	Característica	Parámetro	Principio de la Prueba	Tipo de Celda			
				Calentamiento - Infrarrojo Universal	Cuchilla Individual	Penetración	Otra
Cereales y Leguminosas	Pan	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Corte	X		Alambre
		Firmeza	Fuerza máxima	Compresión	X		Compresión
		Elasticidad/Frescura	Fuerza máxima	Recuperación/relajación a la compresión	X		Compresión
		Fresco	Fuerza máxima	Penetración	X	X	
		Compresibilidad de la miga	Fuerza máxima	Compresión	X		Compresión
	Masa para pan	Extensibilidad	Fuerza máxima	Resistencia a la tensión	X		Extensiógrafo
		Extensibilidad biaxial	Presión máxima	Resistencia a la presión	X		Sistema de inflamiento de Dobraszczyk/Roberts
		Extensibilidad biaxial	Presión máxima	Resistencia a la presión	X		Alveógrafo
		Adhesividad	Fuerza máxima	Compresión-retracción	X		Compresión
		Cambio de volumen durante la fermentación	Incremento de volumen	Registro de una fuerza constante en la superficie y	X		
		Mazclado	Torsión	Resistencia a la torsión	X		Mixógrafo
		Extrusión y amasado	velocidad de mezclado	amasado drástico			Resistógrafo
	Galletas	Firmeza de la masa	Fuerza máxima	Punción	X	X	
		Fracturabilidad (crujiente)	Fuerza máxima	Ruptura transversal	X		Doblado
	Pasta	Fracturabilidad de pasta cruda	Fuerza máxima	Ruptura transversal	X		Doblado
		Flexibilidad de pasta cruda	Fuerza máxima	Compresión transversal	X		
		Firmeza de pasta cocida	Fuerza máxima	Compresión	X		Compresión
Adhesividad en pasta cocida		Fuerza máxima	Compresión-retracción	X		Compresión	
Tensión en pasta cocida		Fuerza máxima	Tensión	X		Tensión y elasticidad	

Cereales y Leguminosas	Tortillas	Flexibilidad	Fuerza máxima	Doblado	X		
		Extensibilidad	Fuerza máxima/distancia	Extensión	X		Tensión y elasticidad
		Rotabilidad	Fuerza máxima	Fuerza requerida para enrollar una tortita en un	X		
	Masa	Elasticidad/extensibilidad	Fuerza máxima	Extensión	X		
		Adhesividad	Fuerza máxima	Compresión-retracción	X		Compresión
	Pasteles y productos similares de	Suavidad/dureza	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X	
		Tenacidad	Fuerza máxima	Corte	X	X	Alambre
		Firmeza	Fuerza máxima	Compresión	X		Compresión
		Elasticidad (recuperabilidad)/Frescura	Fuerza máxima	Recuperación/relajación a la compresión	X		Compresión
	Arroz cocido	Adhesividad	Fuerza máxima	Compresión-retracción	X		Compresión
		Suavidad/Dureza	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X	Corte fino
	Cereal para el desayuno	Fracturabilidad (crujiente al hidratarse)	Fuerza máxima	Compresión	X	X	Ottawa
	Nueces y cacahuates	Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Corte		X	X
		Suavidad/dureza	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X	
	Frijoles secos y cocidos	Suavidad/dureza	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X	
	Papas blancas	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X	
		Punto de rendimiento	Fuerza máxima	Punción		X	X
Papas a la francesa	Firmeza	Fuerza máxima	Punción		X	X	
	Presencia de costra	Fuerza máxima	Punción		X	X	

Producto	Característica	Parámetro	Principio de la Prueba	Tipo de Celda				Otra
				Cizallamiento - Compresión	Universal	Cuchilla individual	Penetración	
Misceláneos	Pasta de jomate	Consistencia	Fuerza máxima-grado de flujo	Compresión por anticho o retro-extrusión	X			Extrusión/retroextrusión
	Snacks	Fracturabilidad	Fuerza máxima	Punción		X	X	
		Fracturabilidad (crujiente)	Fuerza máxima	Compresión	X	X		Ottawa
	Dip	Adhesividad	Fuerza máxima	Punción-retracción		X	X	
		Firmeza	Fuerza máxima	Penetración		X	X	
		Consistencia	Fuerza máxima	Extrusión		X		Extrusión
		Consistencia	Fuerza máxima	Retroextrusión		X		Retroextrusión
	Crema de Cacahuete	Untabilidad	Fuerza máxima-grado de flujo	Retroextrusión		X		Celda de untabilidad
	Crema de Cacahuete	Adhesividad	Fuerza máxima	Compresión-retracción		X		
	Huevos	Resistencia a la ruptura	Fuerza máxima	Fuerza de ruptura		X		Compresión
	Geles y productos semi-sólidos como grasas, gelatina, pastas, y prod. Farmacéuticos	Punto de rendimiento	Fuerza máxima	Punción		X	X	
		Adhesividad	Fuerza máxima	Punción-retracción		X	X	
		Dureza/suavidad	Fuerza máxima	Penetración		X		Compresión
		Firmeza	Fuerza máxima	Punción		X	X	Geómetro de Bloom
		Consistencia	Fuerza máxima	Extrusión		X		Extrusión
		Consistencia	Fuerza máxima	Retroextrusión		X		Retroextrusión
	Alimento seco para mascotas	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X		X	Ottawa
	Alimento húmedo para mascotas	Dureza	Fuerza máxima	Compresión-cizallamiento	X	X		Ottawa
		Consistencia	Fuerza máxima	Extrusión		X		Ottawa
		Dureza	Fuerza máxima	Cizallamiento múltiple	X	X		Kramer

11. BIBLIOGRAFÍA

Libros

1. Barnes, H.A. et al., Rheology Series 3: an Introduction to Rheology, ed. Elsevier, 1989, E.U.A., pp 4 - 6.
2. Bourne, Malcolm C., Food Texture and Viscosity Concept and Measurement, ed. Academic Press, 1982, E.U.A., pp. 25, 32, 41, 42, 131, 132, 135, 138, 150, 153, 154, 175 - 177, 204 - 206, 225 - 230, 232, 233, 236, 237, 240, 244, 252 - 259, 280, 281, 283 - 285.
3. Moskowitz, Howard, Food Texture Instrumental and Sensory Measurements, ed. Marcel Dekker, 1987, pp. 4, 5, 7 - 9, 12 - 24, 26, 27, 29 - 31.
4. Pedrero, D. y Pangborn, R., Evaluación Sensorial de los Alimentos. Métodos Analíticos, Ed. Alhambra, 1a. Reimpresión, 1996, México, pp. 15 - 17, 65 - 79, 82, 84, 87, 90, 92, 97, 99, 103 - 105.
5. DeMan, J.M. et al., Rheology and Texture in Food Quality, The Avi Publishing Company, 1976, E.U.A., p.p. 8, 9, 15, 80, 81, 120, 126 - 129, 153, 154, 159 - 161, 165, 166, 168, 180, 184, 187, 199, 200, 201, 204 - 206, 211, 212, 287 - 301, 311 - 317, 319 - 324, 339-342, 382 - 384, 386, 387, 393, 405, 416-421, 560.
6. Steffe, J., Rheological Methods in Food Processing Engineering, Freeman press, 1996, 2ª. Edición pp. 3, 4.
7. Kramer, A y Szczesniak, A., Texture Measurements of Foods, D. Reidel Company, 1973, Países Bajos, pp. 4, 5, 10 - 12, 33, 40, 73 - 77, 79 - 83, 85 - 88, 90 - 97, 118.

Revistas

8. Borwankar, R., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review, Journal of Food Engineering, Vol. 16, 1992, pp. 2, 3, 5, 6, 12.
9. Bourne, M.C., Converting from Empirical to Rheological Test on Foods - It's a Matter of time, Cereal Foods World, Enero, 1994, Vol. 39, pp. 37 -39.
10. Brochetti, D y Penfield, M.P., Speech Analysis Techniques: a Potential Model for the Study of Mastication Sounds, Journal of Texture Studies, Febrero, 1992, Vol. 23, p.p. 111 - 113, 117, 118, 133, 134.
11. Chang, Y.K. y Ferrari, M.C., A New Apparatus for the Evaluation of Rheological Properties of Wheat Gluten, Acta Alimentaria, Febrero, 2000, Vol. 29, pp. 169 - 179.

12. Hernández López, A., El Imperio de los Sentidos, Énfasis Alimentación., dic-enero 2002, Vol. 7, pp. 6, 7.
13. Karlsen, A.M. et al., Instrumental and Sensory Analysis of Fresh Norwegian and Imported Apples, Food Quality and Preference, 1999, Vol. 10 pp. 305 - 314.
14. Kulmyrzaev, A. y Mc. Clements, D. J., High Frequency Dynamic Shear Rheology of Honey, Journal of Food Engineering, Abril, 2000, Vol. 45, pp. 219 - 224.
15. Lee, S.Y. et al., Relating Descriptive Analysis and Instrumental Texture Data of Processed Diced Tomatoes, Food Quality and Preference, Junio, 1999, Vol. 10, pp. 447 - 455.
16. Lyon, B.G. et al., Sensory and Instrumental Relationships of Texture of Cooked Rice from Selected Cultivars and Postharvest Handling Practices, Cereal Chemistry, Enero, 2000, Vol. 77, pp. 64 - 69.
17. Park, B et al., Ultrasonic Spectral Analysis for Beef Sensory Attributes, Journal of Food Science, 1994, Vol. 59, pp. 697, 698.
18. Sánchez, M.T.T., Food Texture: Concept and Measurement, Alimentaria, Mayo, 1996 pp. 30 - 32.
19. Segnini, S. et al., Relationship between Instrumental and Sensory Analysis of Texture and Color of Potato Chips, Journal of Texture Studies, Junio, 1999, Vol. 30, pp. 677 - 690.
20. Skriver, A. et al., Relation between Sensory Texture Analysis and Rheological Properties of Stirred Yogurt, Journal of Dairy Research, Abril, 1999, Vol. 66, pp. 609 - 618.
21. Smewing, J. American Association of Cereal Chemists, Inc., Analyzing the Texture of Pasta for Quality Control, Cereal Foods World, Enero, 1997, Vol. 42, pp. 8 - 12.
22. Tesch, R. et al., Comparison of the Acoustic and Mechanical Signatures of Two Crunchy Cereal Foods at Various Water Activity Levels, Journal of the Science of Food and Agriculture, 1996, Vol. 70, pp. 347 - 354.
23. Thybo, A. y Martens, M., Instrumental and Sensory Characterization of Cooked Potato Texture, Journal of Texture Studies, Marzo, 1999, Vol. 30, pp. 259 - 278.
24. Valles, P.B, et al. Understanding of how Moisture Cereal Products: Mechanical and Sensory Measurements of Crispness, Journal of the Science of Food and Agriculture, Noviembre, 2000, Vol. 80, pp. 1679 - 1685.

25. Vincent, J.F.V. et al., The Wedge Fracture Test a New Method for Measurement of Food Texture, Journal of Texture Studies, Enero, 1991, Vol. 22, EUA. pp. 45 – 56.

26. Szczesniak, A.S., Texture is Still an Overlooked Food Attribute?, Food Technology, Septiembre, 1990, pp. 86, 90 – 95.

Tesis

27. Villamil, R.M., Aproximación a la Reología. Teoría, Aspectos Prácticos e Investigación en Alimentos, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, México, 1987 p.p. 44, 46, 86, 87, 89.

Manuales

28. Texture Technologies Corp. Your Reference Manual for Texture Analysis, pp. 4 - 17.

Conferencias

29. Cerón, E. Hidrocoloides: Sinergismo y Selección, Rhodia de México. Exposición ATAM 2000

Consultas por Internet

30. <http://osu.orst.edu/food-resource/texture/index.html>.

31. <http://osu.orst.edu/food-resource/texture/index.html>

32. <http://stablemicrosystems.com/apmnov98.htm>.

33. <http://www.ag.uiuc.edu/~fs401/CH8vol1.html>.

34. <http://www.ee.washington.edu/class/539/Lectures/lecture7/sld005.htm>.

35. <http://www.ee.washington.edu/class/539/Lectures/lecture7/sld007.htm>.

36. <http://www.seedburo.com/chopin/product/alveo.htm>.

37. <http://www.stablemicrosystems.com/apmdec96.htm>.

38. <http://www.stablemicrosystems.com/apmfeb00.htm>.

39. <http://www.stablemicrosystems.com/apmjan99.htm>.

40. <http://www.stablemicrosystems.com/apmjun99.htm>.

41. <http://www.stablemicrosystems.com/press.htm>.