

UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas.
Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química.



PARÁMETROS MECÁNICOS Y TEXTURA DE LOS ALIMENTOS

Eduardo Castro Montero

Profesor, Ingeniero Civil de Industrias

Mención Química, Magíster en Ciencias de los Alimentos

Roger A. de Hombre Morgado

Profesor, Licenciado en Química,

Doctor en Ciencias Técnicas

Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia,

La Habana, Cuba

2007

*Dedicado a
Patricia del Carmen
Bravo Rivera
quien ha sido la
luz de mi alma*

Eduardo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
INDICE GENERAL	ii
INDICE DE TABLAS	iv
INDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	x
SUMMARY	xi
CAPÍTULO I. EL CUERPO ELÁSTICO	1
Propiedades mecánicas	1
Elasticidad	1
Módulo de rigidez	5
Módulo de compresión volumétrica	5
Coefficiente de Poisson	7
Métodos de medición de propiedades mecánicas	8
Curva de compresión	13
Módulo de deformabilidad	15
Deformación real	21
Curvas de esfuerzo real versus deformación real	22
Aplicaciones de los parámetros mecánicos	29
CAPÍTULO II. SÓLIDOS VISCOELÁSTICOS	33
Modelos Viscoelásticos	34
Modelo de Maxwell	34
Modelo de Maxwell generalizado	36
Modelo de Kelvin	37
Modelo de Burgers o Modelo de los cuatro elementos	40
Pruebas de relajación de esfuerzo	41
Normalización y linealización de los datos de las pruebas de relajación	46
Normalización de las curvas de relajación	47
Curvas de relajación de geles	63
Influencia de diversos factores en los resultados de las pruebas de relajación	74
Curvas de relajación de frutas y vegetales previamente deformados	78

Elementos de ruptura y pruebas de capacitancia	81
Combinación de elementos	81
Modelos continuos	84
Análisis matemático del efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de los materiales viscoelásticos	86
Relación esfuerzo-deformación de un elemento de Maxwell	88
Ensayos de relajación y capacitancia	90
Alimentos esponjosos	94
Modelación	96
Determinación del grado de elasticidad	100
Vida útil	103
Mazapán	103
Masa rollo	104
CAPÍTULO III. MEDIDORES DE TEXTURA DE SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS	108
Penetrómetros	110
Pruebas de penetración con un texturómetro	112
Compresímetros	116
Pruebas de compresión de un texturómetro	117
Pruebas de corte o cizalla	119
Extrusímetros y pruebas de extrusión	120
Pruebas de flexión y doblado	122
Pruebas de torsión	125
Pruebas de tensión	126
Otros tipos de pruebas	127
Máquinas universales	129
REFERENCIAS	131
GLOSARIO	142

INDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
1.1. Parámetros texturales de la pasta y del snack (Castro y col., 1996)	15
1.2. Valores promedios de “K” y “n” para pasas con DO y sin DO con distintas humedades (Castro y col., 1997)	26
3.1. Encuesta sobre métodos reológicos utilizados en la industria.	108
3.2. Firmeza del Yogur (Fi), por penetración con el INSTRON 1140, según la temperatura de incubación (T inc) y la presión de homogeneización (P hom).	116

INDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1.1. Resorte “elemento elástico ideal”	2
1.2. Reograma para el sólido elástico ideal.	2
1.3. Reograma para un sólido real	3
1.4. Esquema de alargamiento de un resorte	4
1.5. Reograma para el sólido de Hooke	4
1.6. Deformación tangencial de un cuerpo cúbico	5
1.7. Equipo para medir módulo de compresión volumétrica White y Mohsenin (1967)	6
1.8. Esquema de la prueba de alargamiento.	8
1.9. Esquema de flexión de una viga cilíndrica empotrada de diámetro D	9
1.10. Puente de flexión	9
1.11. Curva de compresión snack de chorito (<i>Mytilus chilensis</i>) congelado. (Castro y col., 1996)	14
1.12a. Curvas σ vs ϵ	22
1.12b. Curvas σ vs ϵ reales	22
1.13. Curva esfuerzo real-deformación real para filete de pescado	23
1.14. Modelo tipo Ley de la Potencia de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)	25
1.15. Curvas esfuerzo vs deformación real de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)	27

1.16. Curvas de compresión de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)	28
1.17. Curva actividad del agua vs ln módulo.	30
2.1. Curva de esfuerzo vs tiempo de un cuerpo viscoelástico	33
2.2. Curva deformación vs tiempo de un cuerpo viscoelástico.	33
2.3. Representación mecánica del modelo Maxwell	34
2.4. Diagrama deformación-tiempo para un producto maxwelliano	34
2.5. Curva esfuerzo vs tiempo a deformación constante	35
2.6. Modelo generalizado de Maxwell.	36
2.7. Modelo de Kelvin-Voigt	37
2.8. Curva reológica típica para el sólido de Kelvin-Voigt	38
2.9. Representación mecánica del modelo de Kelvin generalizado	39
2.10. Representación mecánica del modelo de Burgers.	40
2.11. Curva reológica para el cuerpo de Burgers	40
2.12. Curva de esfuerzo versus tiempo de un cuerpo viscoelástico	41
2.13 Modelo Burgers modificado	43
2.14 Modelo de tres elementos de Maxwell	43
2.15. Modelo mecánico de seis elementos para el helado congelado.	43
2.16. Modelo mecánico de 4 elementos para el helado derretido	44
2.17. Modelo modificado de Bingham	45
2.18. Modelo mecánico de tres elementos para masa de harina.	45
2.19. Curva de relajación de sólidos elásticos, sólidos viscoelásticos y líquidos viscoelásticos (Peleg, 1979)	47

2.20. Curva de relajación normalizadas de sólidos elásticos (1), sólidos viscoelásticos (2 y 3) y líquidos viscoelásticos (4) (Peleg, 1976)	48
2.21. Curva de relajación linealizada de sólidos elásticos (1), viscoelásticos (2y3) y líquidos viscoelásticos (4) (Peleg,1976).	49
2.22. Curva típica de linealización de Peleg (Nussinovich y col., 1990) con $\sigma_0=F_0/A$ Y $\sigma(t)=F(t)/A$	50
2.23. Curva de relajación normalizada de gel de agar (5%) (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg, 1979)	53
2.24. Curva de relajación normalizada de manzana (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)	54
2.25. Curva de relajación normalizada de pera (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)	55
2.26. Curva de relajación normalizada de queso cheddar (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)	56
2.27. Curva de relajación normalizada de papa (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)	57
2.28. Curva de relajación normalizada de boloña y pan (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)	58
2.29. Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienas a 28°C , altura inicial 9 mm (Castro, 1995).	59
2.30. Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienas a 28°C , altura inicial 20 mm (Castro, 1995).	60
2.31. Curvas de relajación de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)	61
2.32. Curvas de relajación normalizadas de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)	62
2.33. Curvas de relajación linealizada de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)	63

2.34. Curva de relajación normalizada de gel de agar (5%) (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg, 1979)	66
2.35. Curva de relajación snack de chorito (<i>Mytilus chilensis</i>) congelado (Castro y col., 1996)	69
2.36. Representación esquemática del modelo de Maxwell generalizado con los elementos para representar comportamientos de fluencia y compresión cuando estos varían con la deformación (Peleg y Normand, 1982)	72
2.37. Representación esquemática del modelo de Maxwell generalizado con los elementos para representar comportamientos de fluencia y compresión cuando estos varían con la deformación (Peleg y Normand, 1982)	75
2.38. Esquema del modelo de compresión utilizado para el estudio (Peleg y Norman, 1982)	76
2.39. Esquema del modelo utilizado para el estudio (Peleg y Normand, 1982)	77
2.40. Representación esquemática de las curvas de fuerza de relajación de modelos deformados de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976)	78
2.41. Relaciones entre fuerza residual (F_∞) y deformación de un modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976)	79
2.42. Curvas de creep de un elemento de Maxwell en serie con un elemento de rotura; a la izquierda el criterio de rotura es la tensión crítica y a la derecha es la deformación crítica (Peleg, 1983), σ_1, σ_2 son las tensiones constantes y σ_c es la tensión de rotura, ϵ_c es la deformación de rotura.	81
2.43. La relación de sierra entre el esfuerzo y la deformación de un modelo formado por dos elementos elásticos y de rotura con diferentes tipos de criterio de activación σ_c y ϵ_c (Peleg, 1983).	82

2.44. Esquema de un modelo de tres elementos (Peleg, 1983)	83
2.45. Esquema de las posibles respuestas de un modelo de tres elementos con dos criterios de ruptura (ϵ_{c1} y ϵ_{c2}) en la deformación a velocidad de deformación constante (Peleg, 1983)	83
2.46. Esquema de las posibles respuestas de un modelo de tres elementos con dos criterios de ruptura (ϵ_{c1} y ϵ_{c2}) en prueba de relajación y capacitancia (Peleg, 1983)	84
2.47. Esquema de las curvas típicas de creep obtenidas de materiales sólidos a diferentes tensiones (Peleg, 1983)	85
2.48. Esquema del modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Normand, 1982)	86
2.49. Representación esquemática de experimentos de deformación y relajación (V es la velocidad de deformación). Nótese que un sólido viscoelástico se deforma a velocidad muy baja y casi no se relaja (Purkayastha y Peleg, 1986)	90
2.50. Esquema de la progresión de un ensayo de capacitancia y la forma en que la deformación asintótica y capacitancia asintótica fueron calculados por Purkayastha y Peleg (1986)	91
2.51. Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienas a 28°C, altura inicial 9 mm (Castro, 1995)	93
2.52. Esquema de la forma típica de la curva esfuerzo de compresión vs deformación para alimentos esponjosos (Peleg y col., 1989)	95
2.53. Esquema que muestra los efectos de la magnitud C_1 , C_2 y C_3 en las curvas esfuerzo-deformación (Peleg y col., 1989)	96
2.54. Esquema de la relación esfuerzo-deformación de marshmallows en ciclos de compresión sucesivos (Lee y col., 1983)	100
2.55. Curva de esfuerzo real vs deformación real para la masa rollo a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997)	103

2.56. Curva de esfuerzo real vs deformación real para la masa de fruta a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997)	104
2.57. Curva de esfuerzo real v/s deformación real para la masa orange a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997)	105
2.58. Curva de esfuerzo real vs deformación real para las frutas terminadas a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997)	106
3.1.- Algunos Penetrómetros manuales	110
3.2. Penetrómetro para grasas de ASTM.	111
3.3. Plomada para mayonesa	112
3.4. Curvas de penetración con texturómetro.	113
3.5. Esquema de una prueba de penetración	114
3.6. Curva típica de penetración de un cono en barras de chocolate	115
3.7. Curva generalizada del Análisis del Perfil de Textura	118
3.8. Curva típica de extrusión	121
3.9. Esquema de pruebas de flexión	122
3.10. Pruebas de flexión para bacon cocido	124
3.11. Esquema de torsión de un cuerpo	125
3.12. Celda de Kramer	127
3.13. Curvas típicas obtenidas por la celda Kramer, para diferentes alimentos	128
3.14. Medidor de textura de SMS	130

PROLOGO

A pesar de que los métodos de análisis de las propiedades mecánicas y de textura de los productos alimenticios se conocen desde hace más de 50 años, son escasos en el mercado libros dedicados a estas temáticas publicados en castellano. Por lo general la literatura que existe se ha editado en idioma inglés. Este libro se presenta como un esfuerzo por ofrecer aportes al conocimiento y manejo de las técnicas de análisis y debido a la necesidad que existe de unificar criterios acerca de la terminología que debe utilizarse. Se dan a conocer además, algunas de las experiencias de los autores que pueden ser de interés práctico para ingenieros, especialistas y científicos en el área de alimentos de la Región Iberoamericana.

En esta obra, se ha tratado de tomar especial cuidado en la correcta utilización de la terminología hispana tomando como base el glosario de Términos Reológicos editado por Aguilera y Durán en 1996 y distribuido en la Región a través del Programa CYTED.

Como se podrá apreciar, el libro está dividido en tres capítulos.

El primero trata acerca del Cuerpo Elástico y el concepto de Elasticidad como el parámetro más importante del estado sólido. Se presentan y discuten, otros parámetros mecánicos y los métodos fundamentales de medición de estas propiedades. Se acompañan trabajos de la literatura relacionado con las técnicas de medición de las mismas así como trabajos propios desarrollados por los autores.

En el segundo capítulo se describen las características fundamentales del sólido viscoelástico, los modelos mecánicos y las ecuaciones más representativas para alimentos y se dedica especial atención a los trabajos desarrollados por M. Peleg y su expresión normalizada y linealizada de las curvas de relajación de esfuerzos. Se incluyen resultados de artículos relacionados con el tema.

El último capítulo trata acerca de los medidores instrumentales de la textura de los alimentos y se divide según el tipo de prueba: penetración, compresión, cizalla o corte, extrusión, flexión o doblado, tensión, torsión y otros tipos de pruebas.

Los autores exponen algunas experiencias como resultado de investigaciones desarrolladas en diferentes estudios relacionados con el desarrollo de nuevos productos, modificaciones y/o alternativas tecnológicas, control de la calidad, vida de anaquel y otros.

Es deseo de los autores que la obra pueda responder satisfactoriamente a los objetivos para lo cual se publica

Roger de Hombre Morgado

Eduardo Castro Montero

CAPITULO I. EL CUERPO ELASTICO.

PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas de los alimentos juega un papel primordial en el comportamiento de ellos durante el procesamiento, almacenamiento, distribución y consumo. La influencia de los distintos componentes en las propiedades mecánicas y en especial de la temperatura y contenido de agua son vitales para elegir el equipamiento adecuado para su procesamiento. Así el material de envase está diseñado para proteger al alimento de los esfuerzos mecánicos y de la transferencia de agua entre el producto y el medio ambiente. Al consumir el alimento estamos detectando la textura, que también es afectada por las propiedades mecánicas.

Un término muy utilizado en el campo de los alimentos es la elasticidad (stiffness) que es la respuesta del alimento a una fuerza externa. La elasticidad va a cambiar a medida que cambian las propiedades mecánicas del alimento.

ELASTICIDAD

La elasticidad se define como la propiedad de un material por la que recupera su forma y dimensiones originales parcial o totalmente al cesar la acción del esfuerzo aplicado (Aguilera y Durán, 1996).

Un cuerpo es perfectamente elástico si la deformación ocurre instantáneamente con la aplicación de un esfuerzo y esta deformación desaparece completa e instantáneamente cuando se retira el esfuerzo aplicado. Se asume generalmente que existe una relación biunívoca entre el estado de esfuerzo y la deformación en los cuerpos elásticos, de aquí que los efectos dependientes del tiempo sean excluidos.

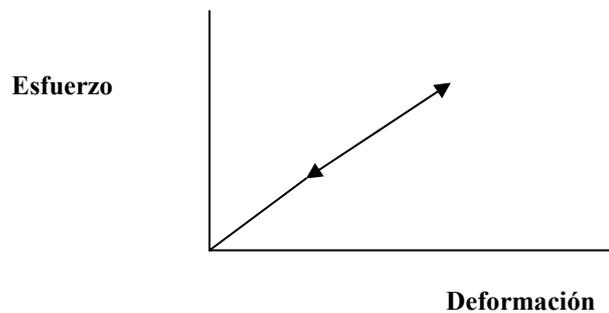
Cuerpo elástico es el sólido ideal o Hookeano y es representado mecánicamente por un resorte (fig. 1.1).



Fig. 1.1. Resorte “elemento elástico ideal”

Para deformaciones pequeñas, algunos cuerpos bajo un esfuerzo axial, exhiben “elasticidad ideal” y el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación. En la figura 1.2 se representa una curva de un “sólido de Hooke”. Obsérvese como el material presenta el mismo comportamiento tanto en la carga como en la descarga.

Fig. 1.2. Reograma para el sólido elástico ideal.



En los materiales biológicos: frutas, vegetales, granos, etc., el comportamiento Hookeano prácticamente no existe. En la figura 1.3 se muestra una curva típica de carga-descarga para alimentos donde se observa la deformación residual en la descarga.

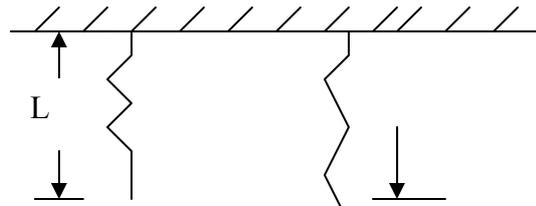


Fig. 1.4. Esquema de alargamiento de un resorte

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_l}$$

(3) donde $\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L}$ y $\sigma = \frac{F}{A}$ (fig. 1.4)

Una representación gráfica de la Ley de Hooke, es la siguiente:

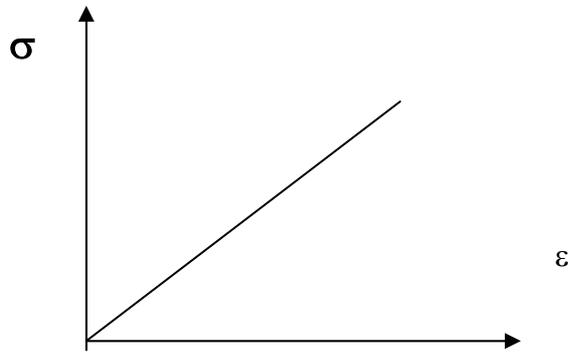


Fig.1.5. Reograma para el sólido de Hooke

El sólido de Hooke carece de viscosidad, tiene estructura y es isótropo. Su comportamiento reológico no está afectado por el tiempo y sigue la ecuación general de estado: Esfuerzo = Deformación relativa x módulo

Módulo de rigidez

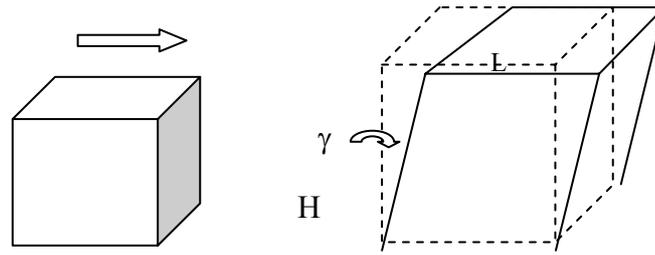


Fig. 1.6. Deformación tangencial de un cuerpo cúbico

Si al cubo de la figura 1.6 se le aplica un esfuerzo tangencial (σ), la deformación viene dada por:

$$\varepsilon_t = L/H = \tan \gamma$$

(4)

En estos casos:

$$\sigma = \varepsilon_t \cdot G$$

(5)

Siendo G el módulo de rigidez, que se define como el cociente entre el esfuerzo de cizallamiento y la correspondiente deformación elástica. Este parámetro es por lo general de 2 a 3 veces menor que el módulo de Young.

Para definir un cuerpo elástico, si éste es isótropo, basta con el módulo de Young y el de rigidez, sin embargo, es frecuente que se midan otras dos constantes: el módulo de compresión o bulto y el coeficiente de Poisson.

Módulo de compresión volumétrica

Si se sumerge un cuerpo en agua, éste se comprime a consecuencia de la presión ejercida por el líquido situado encima. A la deformación causada por la presión hidrostática, la cual se ejerce con igual intensidad en todas las direcciones, se le denomina “deformación volumétrica” $\varepsilon_v = \Delta V/V$. Al módulo correspondiente se le llama “módulo de compresión volumétrica” y se define

como la razón entre la presión aplicada sobre un material considerado isotrópico y su deformación elástica. Su recíproco es la compresibilidad.

$$E = \frac{P}{\varepsilon_V} \quad (6)$$

donde P es la presión y ε_V es la deformación volumétrica.

La medición de este parámetro se ha llevado a cabo muy poco en los alimentos, tal vez debido a la dificultad que existe para desarrollar la prueba bajo condiciones donde la fuerza es aplicada por medios de presión hidráulica.

White y Mohsenin (1967) desarrollaron un aparato para medir este parámetro que esencialmente consta de una cámara presurizada con agua a través de la acción de un pistón y los cambios en volumen pueden obtenerse por medida del desplazamiento lineal del pistón. Un esquema del mismo se muestra en la figura 1.7.

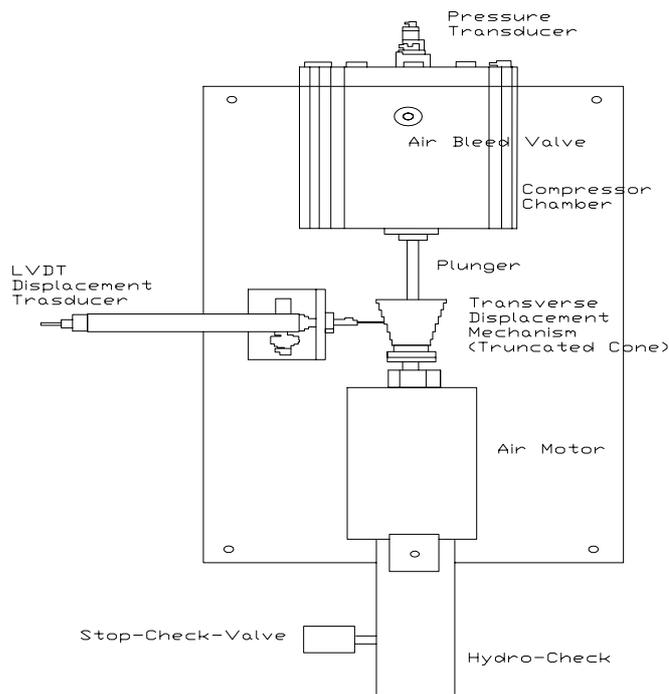


Fig.1.7. Equipo para medir módulo de compresión volumétrica White y Mohsenin (1967)

Sharma y Mohsenin (1970) presentan resultados de este parámetro para manzanas y los de papas son resultados obtenidos por Finney y Hall (1967).

Coefficiente de Poisson.

Casi siempre que un cuerpo se estira o se comprime, cambia de ancho. Al comprimir un cilindro, su diámetro aumenta y al alargarlo, disminuye.

Al cociente de la contracción lateral y el alargamiento longitudinal, dentro del rango elástico, se le denomina “coeficiente de Poisson”, el cual es adimensional:

$$\mu = \frac{\Delta D / D}{\Delta L / L}$$

(7)

El coeficiente de Poisson varía generalmente de 0 a 0,5. Toma el valor de 0,5 en el material que no ocurren cambios de volumen si se comprime, así por ejemplo, la papa tiene valores del coeficiente de Poisson entre 0,45 a 0,49 lo que indica que existe un cambio pequeño en el volumen en comparación con el de la forma. Sin embargo, la manzana tiene valores de 0,21 a 0,34 que significa que el volumen disminuye sustancialmente durante una compresión uniaxial y por otro lado, el pan fresco probablemente tenga valores del coeficiente de Poisson próximos a cero debido a su compresibilidad elevada (Bourne, 1982).

Para definir un cuerpo elástico, si éste es isótropo, basta con medir dos de cualesquiera de los 4 parámetros mecánicos revisados, ya que todos ellos se encuentran relacionados a través de las expresiones siguientes:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{3G} + \frac{1}{9K}$$

(8)

$$E = 3K(1 - 2\mu) = 2G(1 + \mu)$$

(9)

$$\mu = \frac{3K - E}{6K} = \frac{E - 2G}{2G}$$

(10)

Métodos de medición de las propiedades mecánicas.

Existen muchas técnicas y equipos desarrollados para realizar mediciones de alguna de estas propiedades, en cuanto a la determinación del módulo elástico o de Young, las técnicas clásicas de alargamiento (tracción) o flexión son aún muy utilizadas. Estos ensayos se han utilizado para realizar determinaciones en productos tales como: spaghetti, manzanas, papas y otros.

En los ensayos de alargamiento, puede utilizarse la técnica simple de fijar la muestra cilíndrica de una masa determinada M por la parte superior y medir la deformación experimentada, tal como se aprecia en la figura 1.8.

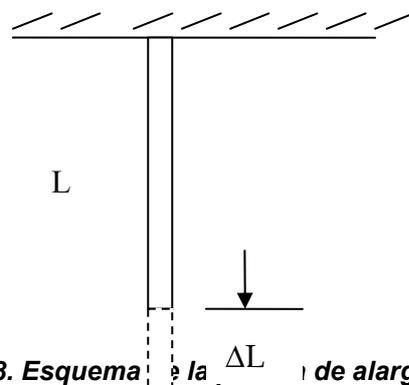


Fig. 1.8. Esquema de la deformación de alargamiento.

El módulo E se calcula mediante la expresión:

$$E = \frac{MgL}{\Delta L \pi r^2}$$

(11)

Donde:

M = masa del cuerpo que se ensaya

g = constante de gravedad.

L = longitud de la muestra.

ΔL = deformación

r = radio de la muestra

Por otra parte, puede fijarse la muestra por uno de sus extremos y colocarla en posición horizontal (cantilever). Aplicando una fuerza en el extremo libre de la barra cilíndrica de diámetro D , se produce una flexión “ d ” (figura 1.9) y entonces:

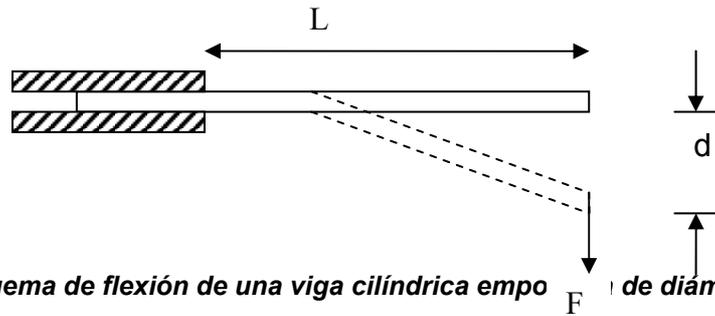


Fig.1.9. Esquema de flexión de una viga cilíndrica empotrada en un extremo y de diámetro D

$$E = \frac{4 FL^3}{3 d \pi D^4}$$

(12)

También puede colocarse la muestra sobre un puente de flexión y aplicar la fuerza en el punto central, como se muestra en la figura 1.10.

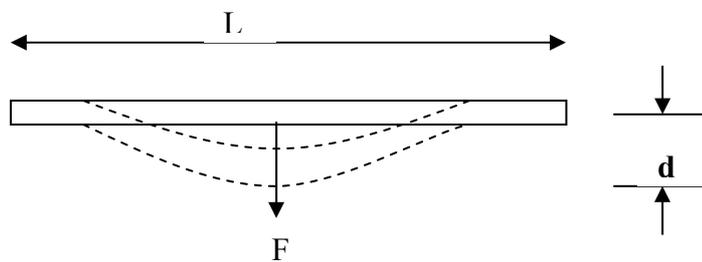


Fig.1.10. Puente de flexión

$$E = \frac{4 FL^3}{3 d \pi D^4}$$

(13)

Las determinaciones de cualquiera de estos cuatro parámetros fundamentales hasta aquí revisados, requieren de determinadas condiciones especiales de ensayo:

- Deformaciones pequeñas (1-3% máximo).
- Material continuo, isotrópico y homogéneo.
- Forma y tamaño de muestra regular y uniforme.

Además, estas pruebas fundamentales son lentas para desarrollar, no se correlacionan adecuadamente con la medición sensorial y requieren de equipamiento costosos. Estas pruebas fueron desarrolladas por científicos e ingenieros interesados en la teoría y práctica de materiales de construcción y no deben ser muy útiles en la medición de lo que se siente en la boca cuando el alimento se mastica Bourne (1982). Debido a estas razones, no se utilizan extensamente en la industria alimenticia pero si tienen utilidad en determinados laboratorios de investigación, sin embargo y de acuerdo con Szczesniak (1963), “las mediciones fundamentales tienen gran valor para los tecnólogos de alimentos ya que puede suministrar las bases para el desarrollo de pruebas empíricas más significativas” da el valor E que indicará cuan elástico es el alimento.

En este sentido y durante los años 60 - 70 se publicaron numerosos trabajos donde se han realizado determinaciones del módulo elástico y otras propiedades mecánicas y su relación con la estructura, composición y calidad de los alimentos. Conford y col. (1964), hicieron esfuerzos por evaluar la relación entre los cambios en la cristalinidad de los geles de almidón y el envejecimiento del pan (Garrido y col., 2004). Las pruebas texturales se utilizaron para determinar la vida útil de pan de molde chileno, al analizar el efecto de una lipasa y una mezcla α -amilasa maltogénica, una lipasa y una mezcla de lecitina con esteaoril lactato de sodio, se presenta una fuerte relación entre la compresión y la textura manual. (Garrido y col., 2004). Otros han utilizado el módulo elástico de la miga del pan para seguir el curso de este mismo proceso y se ha concluido que en general, el módulo elástico aumenta con el tiempo de envejecimiento del pan.

Elton (1969) realizó un estudio similar y reportó una correlación estrecha entre el módulo elástico del pan y la evaluación sensorial de la “frescura”.

La prueba de flexión o de tres puntos se aplicó a pan seco (material poroso) para determinar el módulo de Young que dió generalmente valores

más altos a bajos valores de actividad de agua que los valores obtenidos de los ensayos de compresión y cuando la $a_w \geq 0,75$ no hay diferencia entre los módulos obtenidos por flexión o por compresión. El módulo obtenido por flexión presenta un plateau entre a_w 0,11 y 0,32.

La deformación en la rotura, obtenida de la prueba de flexión permanece más o menos constante hasta $a_w = 0,56$ y aquí se produce un incremento fuerte. Esto está relacionado con los cambios estructurales del pan con a_w . A baja a_w el material es cristalino y muy frágil. Las fallas se propagan rápidamente en la estructura vítrea y provoca la fragmentación y desintegración a baja deformación. Al transformarse en gomoso, la falla de la pared celular no puede propagarse fácil y rápidamente, por lo tanto el material es más dúctil, lo que hace que el material soporte mayor deformación (Chang y col., 2000).

Gámbaro y col. (2002) evaluaron sensorialmente e instrumentalmente muestras de pan blanco comercial a los días 4 y 12 después del horneado y encontraron que la textura sensorial podría ser predicha por lo instrumental y que si no se dispone de instrumentos, los parámetros texturales manuales serían buenos indicadores.

En el caso de prueba de flexión Castro y col. (2004) estudiaron las características texturales de galletas cracker fermentada y no fermentada durante 84 días de almacenamiento a 20°C y 55 % de humedad relativa. Los ensayos realizados fueron flexión o prueba de tres puntos, prueba de penetración y prueba de cizalla en celda Kramer.

Con estos ensayos se determinó que los parámetros texturales del producto fermentado fueron menores que los del producto no fermentado.

La prueba de cizalla en la celda Kramer fue la que presentó mayor precisión arrojando coeficientes de variabilidad menores a 10%, mientras que en las otras pruebas fluctuaron entre 18% y 35%. Ya a los 21 días de fabricación para la galleta cracker fermentada se encontraron diferencias significativas en la prueba de cizalla en celda Kramer, y para la galleta cracker no fermentada se detectó a los 56 días.

Sensorialmente se detectó la existencia de diferencias significativas en la dureza de las galletas cracker fermentadas a los 42 días de almacenamiento y para las galletas cracker no fermentadas a los 84 días.

Las propiedades elásticas de tejidos de frutas y vegetales se han estudiado en un esfuerzo por definir su relación con la textura y estudiar los cambios en la textura durante el crecimiento, desarrollo, maduración y envejecimiento. Somers (1965) reporta que pequeños cambios en la humedad de los tejidos de las papas está asociado con cambios profundos en el módulo elástico.

Finney y Norris (1968) reportan correlaciones inversas entre "E" y el contenido total de sólidos en las papas. Finney (1973) ha sugerido que el módulo elástico debe relacionarse con término "firmeza". Aunque esto pueda ser cierto para algunos materiales, Szczesniak (1963) han indicado que esto no debe ser universalmente aplicado a todos los alimentos. Sugieren que para el caso de productos muy duros o firmes, tal como la zanahoria, el módulo elástico debe correlacionarse bien con la firmeza, ya que la evaluación sensorial de la firmeza está basada en una prueba de flexión.

En un estudio de los cambios bioquímicos asociados con la tenderización de la carne de pollo, Defremery y Pool (1960) (citado por Bourne, 1982), midieron el módulo elástico y encontraron que el valor de éste antes del rigor del músculo, aumentaba 10 veces hasta el establecimiento total de la rigidez muscular.

Las propiedades mecánicas de la carne fueron analizadas utilizando la hoja de cizalla Warner Bratzler y la dureza se determinó evaluando la fuerza máxima de cizalla de cilindros y encontraron que la terneza y la pérdida de peso de la carne cocida depende de la historia térmica del músculo, así entre 60 y 64 °C la dureza disminuye con el tiempo de cocción, se desnaturan las proteínas I y II, entre 66 y 68°C la dureza disminuye al comienzo y después aumenta, esto es debido a la desnaturación de la actina, entre 81 y 90°C la dureza está en el valor más alto sin que se detecten transformaciones (Bertola y col., 1994)

De acuerdo con Chen y Fridley (1972) la maduración de las peras está relacionada con el módulo elástico de las frutas y la medición puede realizarse con facilidad comprimiendo la fruta entre dos bolas de acero hasta una fuerza de 1 kg.

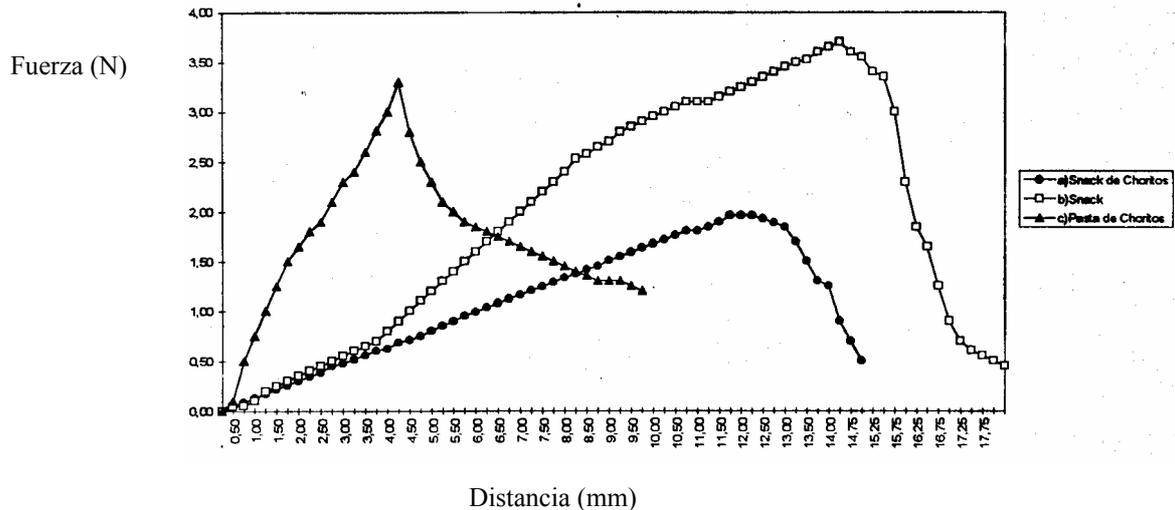
En la actualidad, la utilización cada vez más creciente de texturómetros con elevada precisión y sensibilidad, ha permitido realizar mediciones del módulo elástico mediante pruebas de compresión uniaxial y otros tipos de pruebas. En estos casos, el ensayo debe realizarse a bajas deformaciones de forma tal de lograr el mejor acercamiento posible a las condiciones que indica la Ley de Hooke y puedan ser utilizadas las expresiones teóricas correspondientes.

El empleo del término “módulo elástico” para el caso de los alimentos ha sido discutida ampliamente por Mohsenin y Mittal (1977) y han propuesto el término “módulo de deformabilidad” debido al hecho de que en su gran mayoría, los alimentos son de naturaleza viscoelástica. De esta forma se puede preservar la pureza del significado de este parámetro mecánico fundamental y medido en la zona lineal, es realmente E.

A partir de entonces, surgieron publicaciones donde se realizaron determinaciones del módulo de deformabilidad cuya definición es representativa de la resistencia del material a la deformación. Este término, al igual que el módulo elástico es solo aplicable a pequeñas deformaciones elásticas y depende de las condiciones de la prueba, especialmente de las dimensiones de la muestra así como de la velocidad de deformación (Peleg, 1977). No obstante, si estos efectos dentro de ciertas condiciones experimentales son secundarios en magnitud, tal módulo puede ser un parámetro útil y práctico en la caracterización mecánica de alimentos.

Curva de compresión.

En el caso del ensayo de la curva de compresión de snack de chorito (*Mytilus chilensis*) congelado, se utilizó una máquina de ensayos para surimi Rheotex (Sim Scientific Co. Ltda., Tokio, modelo 305-SD).



- Curva compresión (fuerza-distancia). Snack de choritos (fuerza aplicada en línea media)
- Curva compresión (fuerza-distancia). Snack(fuerza aplicada perpendicular a línea media)
- Curva compresión (fuerza-distancia). Pasta de choritos

Fig.1.11. Curva de compresión snack de chorito (*Mytilus chilensis*) congelado (Castro y col., 1996).

En la figura 1.11 se aprecia que la curva de compresión se realizó al snack en la línea media y perpendicularmente a la línea media (la línea media del snack es la marca que deja el molde en el snack). En este caso, la fuerza de compresión es menor en la línea media que en el caso perpendicular a la línea media debido a las fuerzas residuales del moldeo.

La pasta tiene fuerza máxima muy cercana a la fuerza medida perpendicularmente a la línea media del snack (Castro y col., 1996).

Módulo de deformabilidad.

Parámetros texturales de snack de chorito (*Mytilus chilensis*) congelado:

Parámetro textural	Pasta	Snack (F.L.M)	Snack (F.P.L.M.)
Fuerza de rotura(N)	3,1	1,86	3,71
Cohesividad(mm)	4	11,5	14,25
Rigidez(N/m)	0,77	0,16	0,26
Elasticidad(N/mm)	0,33	0,35	0,76

Tabla1.1. Parámetros texturales de la pasta y del snack (Castro y col., 1996)

En este caso la fuerza de rotura del producto terminado sometido a una fuerza perpendicular a la línea media (F.P.L.M.), es mayor que la fuerza de rotura del mismo sometido a una fuerza en el sentido de la línea media (F.L.M.). Esto es debido a las fuerzas residuales que quedan en el producto debido al efecto del molde para fabricarlos en forma esférica.

La pasta presenta mayor rigidez que los productos elaborados. La elasticidad es mayor en el caso de la medida realizada perpendicular a la línea media, esto es debido a las fuerzas residuales del molde (Castro y col., 1996).

La fuerza de cizalla medida en el tenderómetro Martín dió $5 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,1$, que representaría la fuerza a que estaría sometido el producto en la primera mordida (Castro y col., 1996).

Se realizaron ensayos de flexión a dos marcas de queso mantecoso chileno (Castro y Alvarez, 2002), que permitieron obtener el módulo de Young encontrándose diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) sólo entre

lotes. Pero el comportamiento de los lotes comparado con los ensayos de compresión es totalmente opuesto, lo que podría deberse a un carácter anisótropo del queso.

Se realizaron ensayos de tensión a dos marcas de queso mantecoso chileno (Castro y Alvarez, 2002), que permitieron calcular el módulo de Young obteniéndose diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) solo entre lotes. Pero al compararlos con los valores del módulo obtenido por ensayos de compresión y flexión son totalmente diferentes, lo que lleva a confirmar las características anisótropas del queso mantecoso.

Por medio del análisis de perfil de textura es posible estudiar el cambio de textura del queso Cheddar, así la dureza y elasticidad aumentan mientras la adhesividad y cohesividad de los quesos disminuyen al disminuir el contenido de grasa y aumenta la humedad, estos cambios texturales son debidos a la forma de la matriz proteica que resulta al disminuir el contenido de grasa, ya que la grasa interrumpe las interacciones caseína-caseína haciendo floja la matriz proteica (Bryant y col., 1995).

Rodríguez y col. (2001), midieron las propiedades mecánicas de productos interesterificados de mezclas de sebo y aceite de girasol que variaron entre 50 y 90%(p/p) con metóxido de sodio como catalizador. Las muestras cilíndricas de 2 cm de alto fueron comprimidas hasta 1,4 cm a 70 mm/min en la máquina universal de ensayos de materiales Lloyd LR-5K. Se encontró que la mezcla interesterificada (90:10) tenía una dureza 70% mas que la del sebo y la estructura cristalina estaba formada por esferulitas (configuración globular de cristales estructurados). La adición de 30% de aceite de girasol al sebo ya produce una disminución de la dureza.

Al estudiar el desarrollo y optimización de mantequilla de cabra fermentada (Rodríguez y col., 2003) se midieron las propiedades texturales de los productos obtenidos de distintas concentraciones de cultivo láctico. La dureza se determinó a muestras cilíndricas de 2 cm de alto que fueron comprimidas hasta 1,4 cm a 70 mm/min en la máquina universal de ensayo de materiales Lloyd LR-5K. En que se encontró que la dureza fue significativamente afectada por el tiempo de fermentación ($P \leq 0,05$), mientras

que la concentración de ácido láctico no producía cambios significativos ($P > 0,05$). La mantequilla fermentada de cabra óptima tenía una dureza 20% menos que la mantequilla de leche de vaca y 24% más alta que el control ($P \leq 0,05$), mantequilla de cabra no fermentada.

Kaletung y col. (1991) estudiaron el grado de elasticidad en alimentos sólidos tales como plátano, queso, vienesa, jalea, marshmallow y papa.

El grado de elasticidad de los materiales puede ser caracterizado por la magnitud de la fracción de trabajo recuperable en la primera compresión descompresión.

Los autores encontraron que el plátano conocido como plástico tiene un trabajo recuperable de alrededor de 20%, la vienesa y el marshmallow, conocidas como elásticas tuvieron un trabajo recuperable de 50-60%. Si la deformación no alcanza el nivel de falla, podría establecerse un “grado de elasticidad” relativo a la deformación seleccionada. Desde el punto de vista teórico todos los materiales tendrían un alto grado de elasticidad si son ensayados a deformaciones pequeñas del orden del 1%.

También concluyen que con la selección de una o dos deformaciones en el rango de 10-25% es suficiente para tener una medida relativa de la elasticidad de los alimentos sólidos. El “grado de elasticidad” aumenta con el aumento de ciclos compresión descompresión mientras que el trabajo total disminuye. Esto ocurre en los materiales elásticos a velocidad baja pero en los otros materiales tales como plátano, queso cheddar y tejido de papa, se presenta el fenómeno de compactación. En este caso la magnitud de la fracción de trabajo recuperable en los ciclos segundo al cuarto es una medida de la elasticidad del material compactado y no del original. La compactación es una característica del alimento sólido.

También Kaletung y col. (1991) determinaron la elasticidad de geles con ciclos sucesivos de compresión descompresión.

Ensayaron geles de agar, alginato y Kappa carragenina(1 al 2,5 %) y las muestras cilíndricas fueron sometidas a cinco ciclos de compresión y descompresión a niveles de deformación de 15 a 20%(agar y carragenina) y el alginato con 15, 20 a 20% a velocidades de 10 mm/min.

Encontraron que el trabajo total y el irrecuperable y su dependencia del nivel de deformación y de la concentración son característicos de cada tipo de gel. La parte correspondiente al trabajo irrecuperable, que sirve como medida de la desviación de la elasticidad pueden no estar correlacionados con la fuerza de gel o su deformabilidad o elasticidad. Esto indicaría que el “grado de la elasticidad” sería un atributo independiente y que hay que tomar en cuenta al formular o utilizar estos geles.

Kaletung y col. (1992) determinaron la elasticidad de marshmallow de dos marcas importantes en USA sometiendo las muestras a cuatro ciclos sucesivos de compresión descompresión y cuantificando el trabajo total y recuperable en cada ciclo. Establecen que los marshmallow de las dos marcas son significativamente diferentes a dos velocidades de deformación 10 y 20 mm/min, a las deformaciones de 15 y 40 % y al tiempo aplicado entre los ciclos de 0,30 y 60 s, ya que los marshmallow son viscoelásticos, los resultados podrían ser afectados por la velocidad de reposo entre los ciclos.

Se realizó un análisis de perfil de textura a siete tipos de símiles de queso suizo con aceites vegetales modificados y leche descremada. Un ensayo de dos ciclos de compresión a temperatura ambiente se aplicó a los quesos suizos y se calcularon los parámetros texturales: dureza, adhesividad, elasticidad, cohesividad, gomosidad y chiclosidad. Los valores indicaron que no había diferencias en la textura con los tratamientos excepto en la cohesividad. Este trabajo permitió esclarecer que utilizando aceite de girasol alto oleico sería económicamente ventajoso (Yu y Hammond, 2000).

Saldo y col. (2000) realizaron ensayos de compresión axial de queso de cabra en procesos de alta presión hidrostática para acelerar su maduración en que aplicaron las presiones siguientes: 50 MPa por 72 h (A), 400 MPa por 5 min (B) y 400 MPa por 5 min seguido por 50 MPa por 72 h (C).

Los autores presentan los datos de la forma siguiente:

La deformación $\varepsilon_{(t)} = \Delta L / L_0$

Módulo de deformabilidad E (kgPa), calculado como la pendiente de la regresión lineal.

-Deformación en la rotura (ε_f)

-Esfuerzo en la rotura (σ_f) y a la deformación 0,6 ($\sigma_{0,6}$)

-Trabajo en la rotura (w_f) y a la deformación 0,6 ($w_{0,6}$).

Encontraron que σ_f y ε_f dependían del tratamiento de alta presión a pesar del nivel de proteólisis. En el caso B y C la proteólisis es más alto que el control en que la matriz de caseína está más degradada. Por lo que concluyen que los cambios texturales producidos por esta técnica están relacionados a cambios en el equilibrio del calcio y a los del complejo caseína-calcio.

Se realizaron ensayos de corte o cizalla a dos marcas de queso mantecoso chileno (Castro y Alvarez, 2002), utilizando la hoja Warner-Bratzler con ángulo de corte de 50°.

Con respecto a la cohesividad no se encontró dependencia de este parámetro sensorial con los resultados obtenidos en las mediciones instrumentales.

Al realizar la fuerza se encontró una dependencia bastante pobre entre los parámetros de firmeza bucal sensorial y fuerza máxima instrumental. En el caso de la rigidez se trata de establecer una relación de dependencia entre rigidez y fragilidad sensorial lo que no se obtuvo debido a que la correlación fue baja. Se realizaron los ensayos mecánicos de compresión uniaxial, corte, flexión y tracción a dos marcas de queso mantecoso chileno (Castro y Alvarez, 2002).

De la curva de compresión se obtuvo la elasticidad que presentó diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$), entre lotes de elaboración de queso y no hubo diferencias entre marcas. Sin embargo, al incluir la

variable fecha de análisis como factor, los resultados obtenidos para marcas y valores se mantuvieron, pero se pudo detectar un comportamiento cambiante de las muestras con el tiempo. El lote más joven presentaba mayor elasticidad que el lote más viejo. Al comparar los resultados sensoriales con los instrumentales se pudo comprobar que el instrumento tenía mayor percepción de diferencias que el sensorial. Con respecto al módulo de Young no se encontró diferencias significativas ($P > 0,05$) tanto para lotes como para marcas. Sin embargo, al incluir la variable fecha de análisis no se encontró diferencias entre marcas pero si se encontró entre lotes ($P \leq 0,05$) ni entre fechas de análisis.

La textura de vienas fue estudiada por Castro y col. (1995) aplicando la metodología de flujo comprimido lubricado a área constante y velocidad de 1 mm/s en tres formulaciones con contenido de proteínas alto, medio y bajo. La formulación alto no tenía proteína de soya y la carne magra utilizada fue la de equino. El procedimiento de fabricación fue el habitual de la mediana y pequeña industria chilena.

Las medidas de compresión se realizaron con muestras tomadas en el centro de la vienesa descartando los extremos debido a las fuerzas residuales existentes. Los ensayos realizados en el equipo Rheotex 305-SD establecieron que el esfuerzo máximo de compresión permite discriminar entre las formulaciones con distinto contenido de proteína (formulación alto $1,91 \pm 0,20$ N, medio, $1,62 \pm 0,14$ N y bajo $1,37 \pm 0,16$ N). La rigidez y la elasticidad permiten discriminar entre las formulaciones. También discrimina el ensayo en celda Kramer con el tenderómetro Martín, así la formulación alto dió $441,0 \pm 49,0$ kPa, medio $411,6 \pm 9,8$ kPa y bajo $245,0 \pm 49,0$ kPa, no hay que olvidar que este ensayo es empírico.

Hamburguesas de carne cocidas por ambos lados fueron estudiadas aplicando análisis de perfil de textura por medio de la compresión de cilindros y se determinaron los parámetros de: dureza, cohesividad, elasticidad y chiclosidad. También se aplicó la prensa Kramer para determinar los efectos de cizalla, trabajo de cizalla y el módulo de cizalla. Se estudiaron el efecto del

espesor de las hamburguesas y la temperatura de la freidora. Los parámetros texturales aumentaron al aumentar la temperatura y disminuir el espesor. En la elasticidad no se produjeron efectos (Yorrilla y col., 2000)

La textura de tortilla de maíz fue evaluada por medio de compresión hasta la ruptura. La crocancia fue determinada por el nivel del ruido de cada muestra. Se registró la distancia máxima recorrida por el punzón. Los datos de cada muestra se registraron y fueron utilizados para obtener la dimensión Kolmogorov fractal (Kawas y Moreira, 2001)

La influencia del agregado de almidón a los geles de carne de pescado y la interacción entre los gránulos de almidón y las proteínas del surimi fueron estudiadas por Kong y col. (2001). Concluyen que el almidón en los geles de surimi juega un papel importante en el módulo elástico total haciendo un efecto de empaquetamiento. La mezcla de pasta de pescado con el almidón pregelatinizado a 60° C presentó un módulo mayor que a 90°C y el módulo de surimi y almidón en los geles de carne de pescado a 60°C aumenta con el aumento de almidón.

El módulo de deformabilidad se define a través de la expresión:

$$M = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (14)$$

Donde $\sigma(t)$ y $\varepsilon(t)$ son el esfuerzo y deformación reales respectivamente.

Deformación real

Para materiales incompresibles y suponiendo que la muestra ensayada mantiene su forma durante el ensayo, se puede escribir

$$\sigma(t) = F(t) / A(t) \quad (15)$$

Donde:

F (t): fuerza al tiempo "t".

A (t): área real al tiempo "t"

$$Y \quad A(t) = \frac{A_0 H_0}{H_0 - \Delta H} \quad (16)$$

Donde:

A_0 : Área original

H_0 : Altura original

ΔH : Deformación absoluta

Luego

$$\sigma(t) = \frac{F(t)[H_0 - \Delta H]}{A_0 H_0} \quad (17)$$

y la deformación real en la compresión es:

$$\varepsilon(t) = \ln\left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H}\right) \quad (18)$$

Curvas de esfuerzo real versus deformación real

Las diferencias entre las curvas fuerza-deformación y las curvas esfuerzo real versus deformación real se aprecian en la figura siguiente:

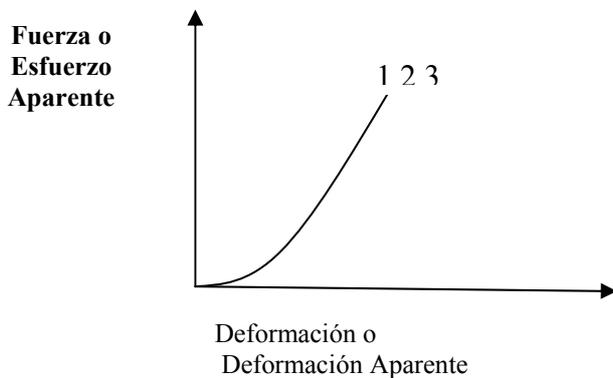


Fig. 1.12a. Curvas σ vs ε reales

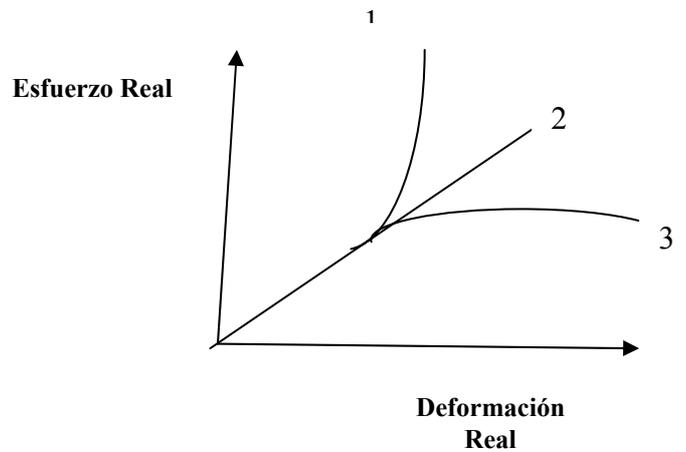


Fig.1.12b. Curvas σ vs ε

La forma de la curva fuerza – deformación y consecuentemente la de la relación esfuerzo – deformación aparente, es típicamente cóncava hacia arriba incluso hasta la fractura. Esta forma es típica de muchos materiales y está determinada fundamentalmente por la progresiva expansión del área de la sección transversal, por lo que es un factor que enmascara su comportamiento mecánico real (fig.1.12a).

Las curvas esfuerzo real versus deformación real pueden presentar concavidad hacia arriba como la curva 1, concavidad hacia abajo como la curva 3 o lineal como la curva 2 (figura 1.12b). Estos casos son indistinguibles como puede apreciarse en la curva de fuerza vs. deformación.

Johnson y col. (1980) han determinado el módulo de deformabilidad de filete de pescado fresco y cocido utilizando una prueba de compresión uniaxial en una máquina Instron a través del cálculo de la pendiente en la parte lineal de la curva esfuerzo real vs. deformación real. Los autores presentan las curvas obtenidas para filete de pescado:

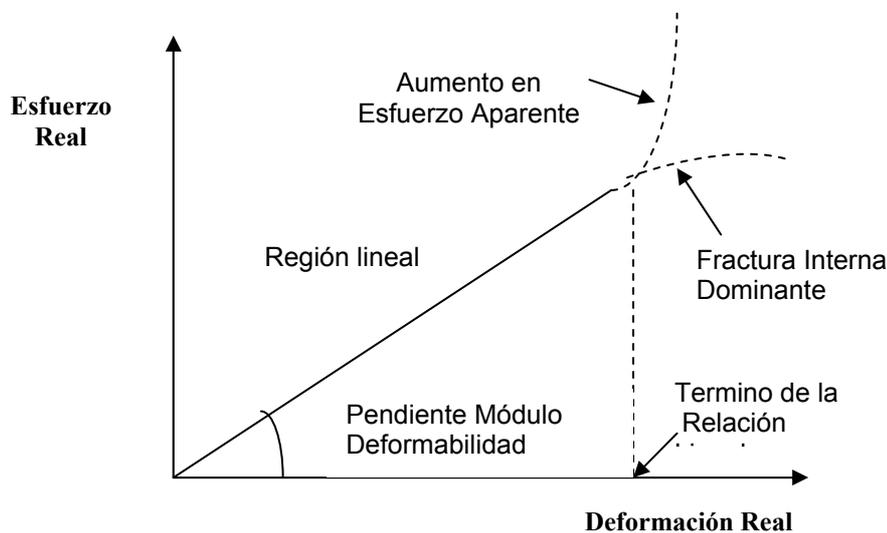


Fig.1.13. Curva esfuerzo real-deformación real para filete de pescado

Señalan que existe una zona lineal y después puede presentarse concavidad hacia arriba, que indica un aumento del esfuerzo aparente y si se presenta concavidad hacia abajo, significa que hay rotura interna.

Roy y Peleg (1989) determinaron el módulo de deformabilidad de diferentes productos (geles de agar, manzana, queso Cheddar y papas) de muestras tomadas en forma cilíndrica y semicilíndrica utilizando una prueba de compresión uniaxial en una máquina Instron. Presentan las curvas normalizadas de fuerza-deformación a las cuales se le ajusta perfectamente un modelo exponencial simple (ley de potencia) donde el coeficiente se relaciona con la "dureza" del material mientras el exponente se afecta tanto por la geometría como por las características estructurales del material. Los resultados del módulo de deformabilidad varían de acuerdo al producto desde 0,47 a 25 kPa.

Castro y col. (1997) presentan un estudio para pasas deshidratadas osmóticamente y secado con aire caliente de las curvas de esfuerzo real versus deformación real. Estos autores determinaron el módulo de deformabilidad del producto utilizando una prueba de compresión uniaxial montada en una máquina Lloyd y reportan el resultado de este parámetro que es de 1,3 N/mm².

Situación análoga se encuentran en las pasas deshidratadas osmóticamente y en las pasas sin deshidratado osmótico (secado convencional).

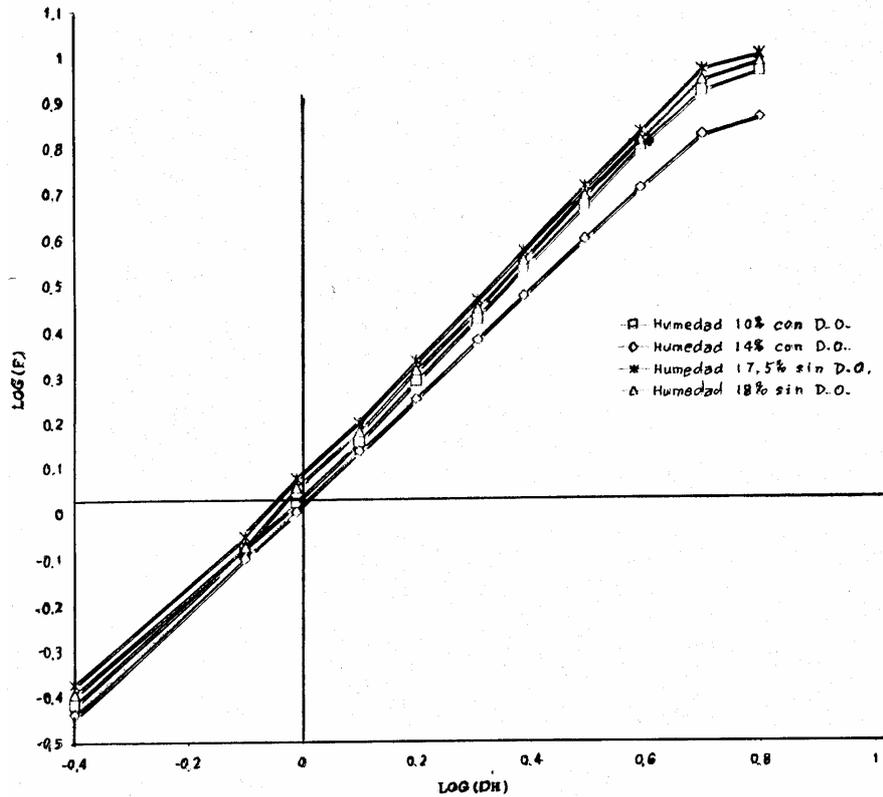


Fig.1.14. Modelo tipo Ley de la Potencia de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.)(Castro y col., 1997)

Las curvas $\log F$ versus $\log \Delta H$ siguen un modelo tipo potencia y son cóncavas hacia abajo (Castro y col., 1997). Concordando con los datos de Johnson y col., 1980.

El modelo ley de la potencia (Peleg y col., 1989) plantea que:

$$F = K(\Delta H)^n$$

(19)

En que:

K : medida dureza (fuerza/longitud²)

n : medida de desviación de la linealidad (adimensional)

$n = 1$: lineal

$n > 1$: concavidad hacia arriba

$n < 1$ concavidad hacia abajo

En el caso de pasas deshidratadas osmóticamente (con DO) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin DO) (Castro y col., 1997). Se aplicó el modelo tipo ley de la potencia y se determinaron los parámetros K y n con un coeficiente de correlación que varió entre 0,95-0,99. Los valores promedios de 34 determinaciones se presentan en la tabla siguiente.

Tratamiento	Humedad Promedio (%)	K (N/mm ⁿ)	n (-)
con DO	14,0 ± 0,7	1,7 ± 0,06	0,7 ± 0,1
con DO	16,0 ± 0,8	1,5 ± 0,09	0,6 ± 0,2
con DO	18,0 ± 0,1	1,3 ± 0,10	0,6 ± 0,2
sin DO	17,5 ± 0,5	1,1 ± 0,05	0,6 ± 0,2
sin DO	18,0 ± 0,1	1,1 ± 0,05	0,6 ± 0,1
sin DO	18,0 ± 0,2	1,1 ± 0,05	0,6 ± 0,1

Tabla 1.2. Valores promedios de “K” y “n” para pasas con DO y sin DO con distintas humedades (Castro y col., 1997)

En las figuras 1.15 y 1.16 las pasas presentaron curvas con concavidad hacia abajo, tanto la de esfuerzo vs. deformación real y la curva simple de compresión.

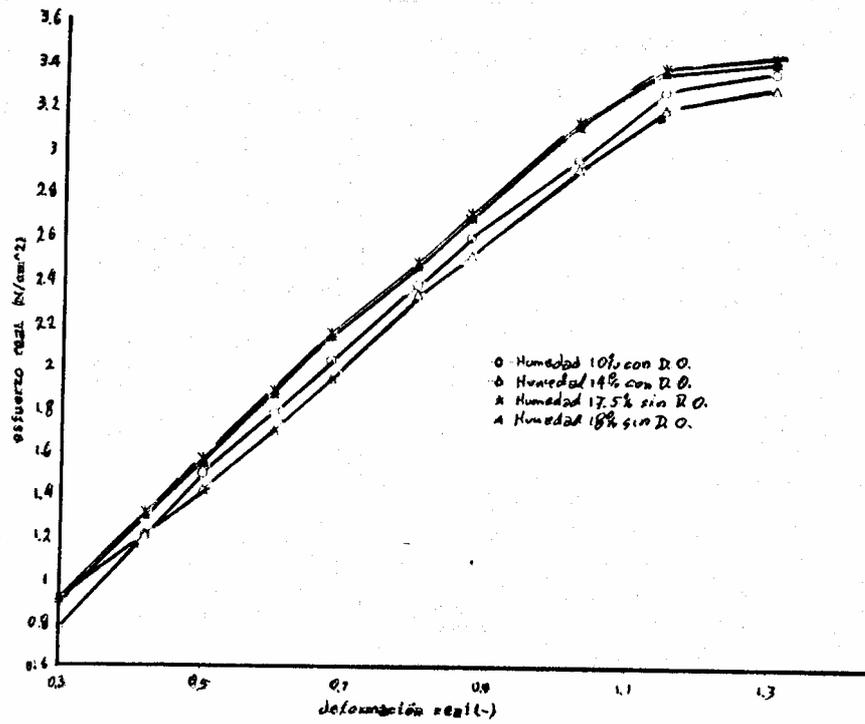


Fig.1.15. Curvas esfuerzo vs deformación real de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)

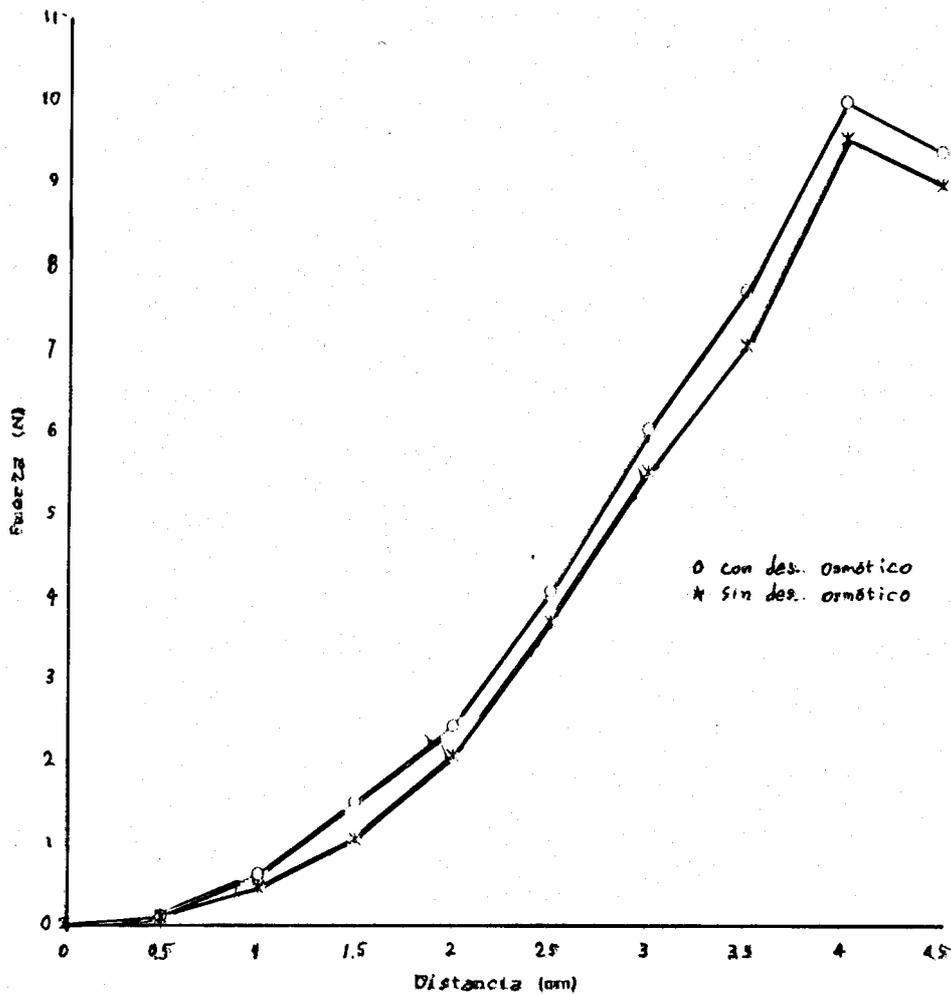


Fig.1.16. Curvas de compresión de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.)(Castro y col., 1997)

Kaletung y col. (1991) realizaron un trabajo parecido al anterior pero en muestras de geles de agar, alginato y k-carragenina para calcular el módulo de deformabilidad como la pendiente de la curva de esfuerzo corregido versus deformación de Hencky a partir de la definición del módulo de deformabilidad como:

$$E_D = \frac{\sigma_{cor}(t)}{\varepsilon_H(t)} \quad (19)$$

Las determinaciones se hicieron en una máquina Instron mediante compresión uniaxial entre platos lubricados y ofrecen los resultados de este parámetro para los geles preparados a diferentes concentraciones.

En otro trabajo Nussinovitch y col. (1990) prepararon geles de gellan a diferentes concentraciones y realizaron pruebas de compresión uniaxial de muestras cilíndricas en una máquina Instron hasta la fractura del gel. Aplicaron la corrección de Hencky, presentan las curvas normalizadas y linealizadas de Peleg junto con los datos del módulo de deformabilidad que estaba en el intervalo de $1 - 6 \text{ kg.cm}^{-2}$.

En un artículo reciente Kong y col. (2001) realizaron determinaciones del módulo de compresión y el esfuerzo máximo a partir de los datos de las curvas Esfuerzo-Deformación para proteína de pescado (surimi), gel de almidón y mezcla de ambos. El producto se preparó en forma de rebanada y se llevó a cabo una prueba de compresión utilizando un aditamento de compresión de 3 cm de diámetro acoplado a un Tensipresser de fabricación japonesa. El módulo de compresión, también nombrado como módulo elástico, se calculó a través de la relación entre el esfuerzo y la deformación a una deformación de 0,2.

Aplicaciones de los parámetros mecánicos

Los efectos del contenido de humedad sobre las propiedades mecánicas (esfuerzo de cizalla, energía de ruptura, módulo elástico) han sido estudiados para trigo, avena, cebada, frijol de soya, maíz, guisantes, frijoles y sorgo. Estas propiedades son importantes para reducir daños a las semillas y granos durante la trilla y en otros tratamientos mecánicos tales como el molinado o la molienda.

Los estudios de las propiedades reológicas de algunas frutas y vegetales muestran que la ruptura de las celdas inmediatamente bajo la piel, se indica por un cambio brusco de la pendiente en la curva fuerza vs. deformación. Esta técnica se ha empleado para evaluar cambios de firmeza durante el crecimiento en el árbol y en el almacenamiento. El esfuerzo correspondiente a este punto (bioyield point) ha sido utilizado como criterio para evaluar la resistencia de la fruta al impacto en la cosecha mecanizada o en la manipulación.

En las conclusiones sobre un simposium celebrado en 1975 en la Universidad de Pennsylvania, USA sobre “Aplicaciones de Diseños de las Propiedades Mecánicas de Alimentos Sólidos”, Morrow (1975)(Citado por De Hombre, 1986) expresó: “ cualquier método que pueda desarrollarse para evaluar daños en una escala uniforme puede ser de extraordinario valor... La rigidez de los productos alimenticios parece ser una característica que se relaciona con algunas propiedades mecánicas para necesidades de diseño. Como la rigidez es un concepto no muy bien establecido, la tendencia es evaluar algún tipo de módulo elástico y relacionarlo con aquél.

La búsqueda de métodos y la construcción de aparatos diversos para evaluar las propiedades mecánicas de los alimentos así como la definición de los términos apropiados y la unificación de criterios, deben continuar su profundización y son temas de estudios actuales de muchos investigadores y tecnólogos.

En las propiedades mecánicas descritas influyen la estructura propia del alimento en cuestión; fuera de esto el estado físico del alimento afecta en forma importante a los alimentos de humedad baja (Roos, 1995).

Los cambios de fase del alimento hacen cambiar sus propiedades mecánicas tal como se muestra en la figura siguiente:

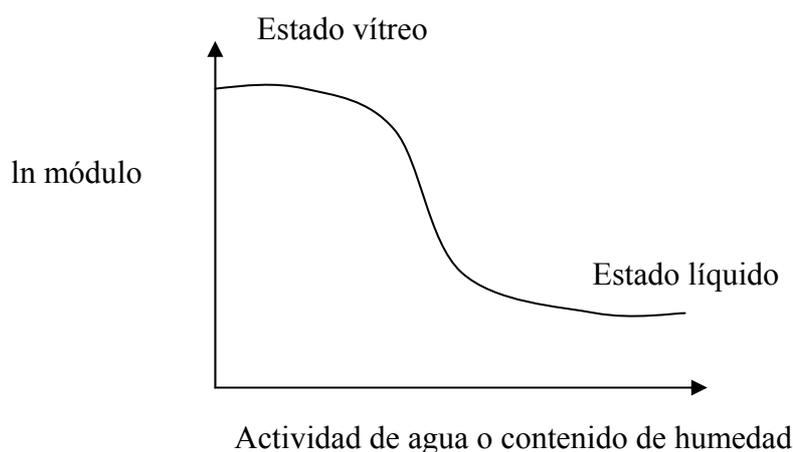


Fig.1.17. Curva actividad del agua vs ln módulo.

Hay que tener presente que las transiciones en alimentos al pasar de un estado totalmente rígido a una estructura plástica en la mayor parte de los casos es gradual antes que un cambio brusco.

Así Peleg (1994) plantea que los cambios en los parámetros mecánicos de biopolímeros pueden ser descritos por el modelo siguiente:

$$Y(X) = (Y_0 \pm KX) / \{1 + \exp[(X - X_c]/b)\} \quad (20)$$

Donde X : parámetro variable (T: temperatura, M: humedad, aw: actividad de agua, o humedad relativa HR)

$Y(X)$: Parámetro mecánico que representa elasticidad (módulo, módulo de almacenamiento, esfuerzo de ruptura), pegajosidad (área bajo la curva esfuerzo deformación)

Y_0 : es la magnitud de $Y(X)$ en el punto de referencia.

K , X_c y b son constantes.

La constante K toma en cuenta los cambios en el estado (rígido). Si $K = 0$ como en la ecuación original de Fernis (Peleg, 1994) $Y(X)$ tiene forma signoide, X_c es el valor de X cuando $Y(X) = Y_0/2$. En este caso alrededor del 90 % de la caída de $Y(X)$ en la plasticización ocurre en el rango de $X \pm 3b$.

Roos (1995) presenta la ecuación general de Peleg:

$$Y/Y_s = 1 / \left\{ 1 + \exp \left[\frac{X - X_c}{a(X)} \right] \right\} \quad (21)$$

$a(X)$: constante que en el caso, por ejemplo, de la curva de elasticidad es la pendiente (X se referiría en ese caso a un contenido constante de agua).

La ecuación anterior se linealiza en la forma siguiente

$$\ln\left(\frac{Y_s}{Y} - 1\right) = \frac{X - X_c}{a(X)} \quad \text{o} \quad \ln\left(\frac{Y_s}{Y} - 1\right) = -\frac{X_c}{a(X)} + \frac{1}{a(X)}X \quad (22)$$

Esta última indica claramente la relación lineal entre $\ln[(Y_s/Y) - 1]$ y X , la constante $a(X)$ que corresponde al 50% del valor de la elasticidad.

La elasticidad, por ejemplo puede ser analizada en términos de la elasticidad relativa Y/Y_s , que indicará entre cero y uno.

La ecuación última da un medio adecuado para modelar la elasticidad ya que representa su comportamiento en función de la temperatura, humedad o actividad de agua. En este caso, se puede representar en tres dimensiones el efecto del agua y la temperatura en la elasticidad.

Pero es necesaria una temperatura de referencia para modelar los efectos combinados de la temperatura y la humedad es suficiente para conocer el valor crítico de la humedad y las temperaturas en que se producen los cambios bruscos de las propiedades mecánicas debido a la transición vítrea y al cambio del estado físico al pasar al estado gomoso (Roos, 1995).

CAPITULO II. SÓLIDOS VISCOELÁSTICOS.

Los alimentos viscoelásticos son aquellos que presentan simultáneamente características viscosas y elásticas.

En un sólido de Hooke, el esfuerzo correspondiente a una deformación dada es independiente del tiempo mientras que para un material viscoelástico, el esfuerzo se disipa gradualmente.

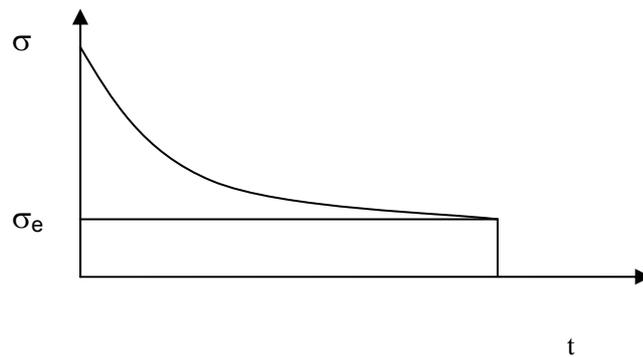


Fig.2.1. Curva de esfuerzo vs tiempo de un cuerpo viscoelástico

La curva de “relajación” es de la forma indicada en la figura y tiene la tendencia a acercarse al eje del tiempo o a un valor asintótico (σ_e) de equilibrio, mientras que la curva de deformación vs. tiempo (fig.2.2), que se revisará más adelante, indica que la deformación aumenta tanto como la fuerza aplicada. La magnitud de la deformación permanente en el cuerpo aumenta con la fatiga aplicada y con el tiempo de aplicación.

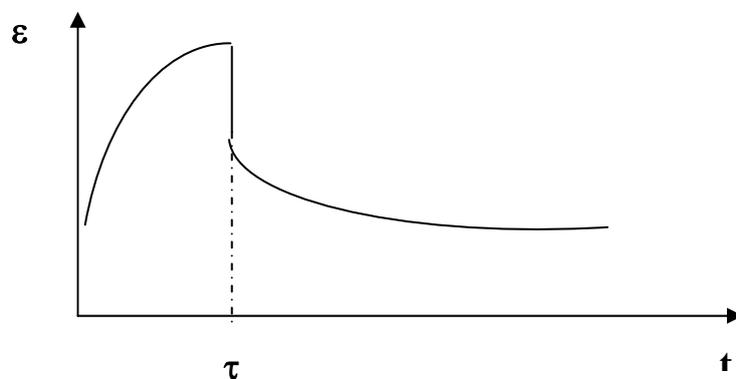


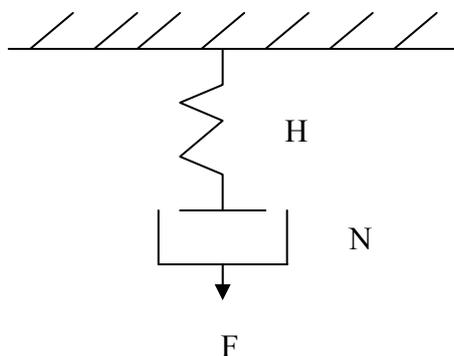
Fig. 2.2. Curva deformación vs tiempo de un cuerpo viscoelástico.

MODELOS VISCOELÁSTICOS

El uso de modelos mecánicos puede ser útil para obtener información acerca del comportamiento viscoelástico de los alimentos. Estos modelos se construyen a partir de la combinación más o menos compleja de elementos sólidos de Hooke (H), representados por resorte y elementos viscosos (N) representados por sistema émbolo-pistón (amortiguador).

Modelo de Maxwell

Representa el comportamiento de los materiales con un resorte y un amortiguador en serie (fig.2.3).



H = elemento elástico de Hooke

N = elemento viscoso de Newton

Fig. 2.3. Representación mecánica del modelo Maxwell

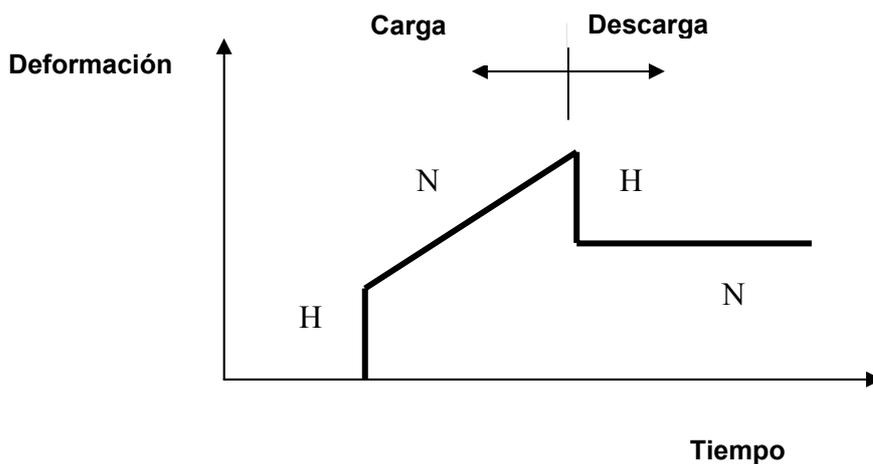


Fig.2.4. Diagrama deformación-tiempo para un producto maxwelliano

Al aplicar una carga F , el resorte (H) se alarga de inmediato y luego lo hace el elemento viscoso (N) lentamente. Al retirar la fuerza, H se contrae mientras que N permanece constante.

La deformación total del sistema, para un tiempo t es la suma de las deformaciones de los dos elementos $\varepsilon(t) = \varepsilon_\eta + \varepsilon_E$ y el esfuerzo es:

$$\sigma = \sigma_\eta = \sigma_E$$

Este comportamiento no se asemeja a la respuesta observada experimentalmente en los materiales viscoelásticos que sometidos a un esfuerzo constante presentan una deformación elástica retardada. Debido a esto, este método no resulta apropiado para estudiar las características viscoelásticas del material.

Una curva típica para un alimento si el cuerpo se somete a una deformación constante (ε_0) puede ser la siguiente:

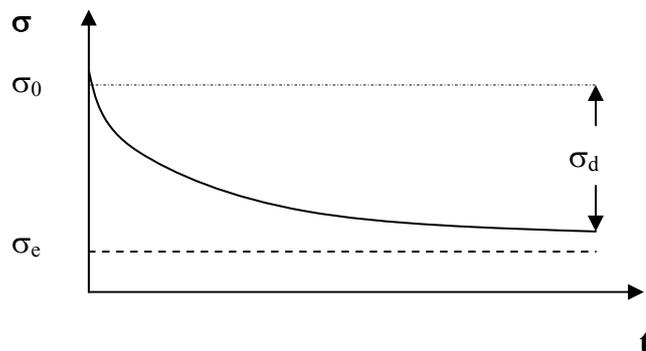


Fig.2.5. Curva esfuerzo vs tiempo a deformación constante

Si el sistema se somete a una deformación constante (ε_0), el esfuerzo inicial (σ_0) disminuye con el tiempo (fig.2.5). Este fenómeno se llama relajación y la variación de esfuerzo en función del tiempo se expresa por:

$$\sigma(t) = \sigma_d \cdot e^{-t/\lambda'} + \sigma_e \quad (23) \quad \text{donde} \quad \sigma_d = \sigma_0 - \sigma_e$$

Donde σ_d es el esfuerzo de decaimiento y σ_e es el esfuerzo residual o de equilibrio luego de un tiempo $t = \infty$, λ' que es el tiempo necesario para que,

en un modelo de Maxwell el esfuerzo disminuya a 1/e de su valor inicial bajo deformación constante.

$$\sigma_e = 0 \Rightarrow \sigma(t) = \sigma_d \cdot e^{-t/\lambda} \quad (24)$$

Si la ecuación: $\sigma(t) = \sigma_d \cdot e^{-t/\lambda} + \sigma_e$ se divide por ϵ_0 queda:

$$E(t) = E_d \cdot e^{-t/\lambda} + E_e \quad (25)$$

Esta ecuación indica que aún a tiempos muy largos algo de esfuerzo quedará en el componente elástico (el resorte no se recupera totalmente).

Se llama relajación al ensayo que se basa en la aplicación de una deformación constante y se utiliza para el estudio de características viscoelásticas de los materiales.

Modelo de Maxwell generalizado

La gran mayoría de los materiales viscoelásticos en que se incluyen los materiales biológicos no se relajan siguiendo una velocidad uniforme, sino que lo hacen en distintas etapas con tiempos de relajación diferentes.

Si se colocaran varios elementos de Maxwell en paralelo se podría solucionar el problema.

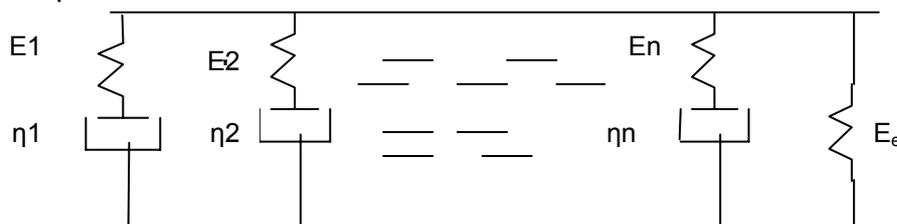


Fig.2.6. Modelo generalizado de Maxwell.

Al someter el sistema a una deformación constante (ϵ_0) la tensión total es la suma de las tensiones soportadas por cada elemento de Maxwell (fig.2.6).

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_e$$

y su decrecimiento con el tiempo está dado por la ecuación:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(F_{d_1} \cdot e^{-t/\lambda_1} + F_{d_2} \cdot e^{-t/\lambda_2} + \dots + E_e \right) \quad (26)$$

En que:

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ son los tiempos de relajación de cada elemento de Maxwell.

E_e es el módulo elástico del equilibrio

Modelo de Kelvin.

Si los elementos “resorte” y “amortiguador” se colocan en paralelo, entonces:

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_\eta \quad (27)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta \quad (28)$$

Que representa el sólido de Kelvin.

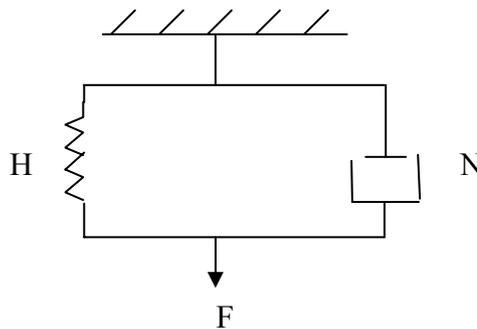


Fig.2.7. Modelo de Kelvin-Voigt

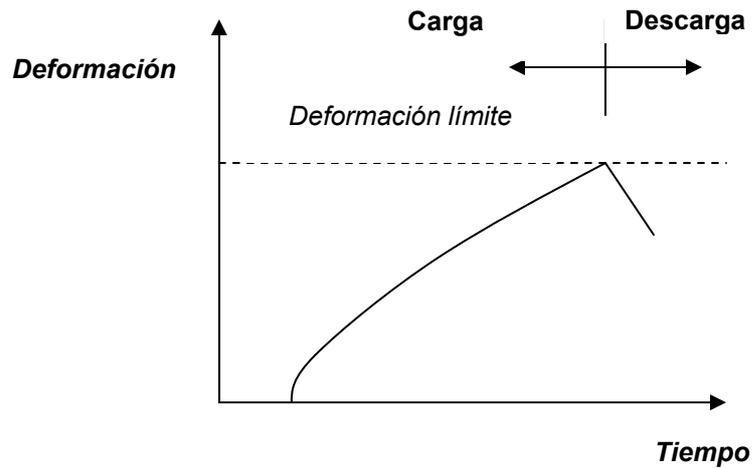


Fig.2.8. Curva reológica típica para el sólido de Kelvin-Voigt

Cuando se aplica una fuerza F , aumentan tanto H como N . Cuando la fuerza cesa, H se acorta lentamente, lo que da origen al fenómeno conocido por “*elasticidad retardada*”. Teóricamente en este modelo, la recuperación tarda un tiempo infinito en producirse. En este caso el tiempo de retardo viene dado por la expresión:

$$t_{ret} = \frac{\eta}{G} = \lambda' \quad (29)$$

Donde λ' es el tiempo necesario para que en un modelo de Kelvin, la deformación disminuya a $1/e$ de su valor original después de retirar el esfuerzo.

La expresión que define el cambio de la deformación con el tiempo es para este caso:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_x \cdot e^{-t/\lambda'} \quad (30)$$

Al momento de retirar el esfuerzo aplicado, el sistema tiende a recuperar su estado inicial a partir de la deformación alcanzada ε_x en un tiempo infinito. Esta técnica de estudio es conocida por “capacitancia” (creep compliance), la cual será analizada más adelante.

El modelo generalizado de Kelvin se presenta a continuación:

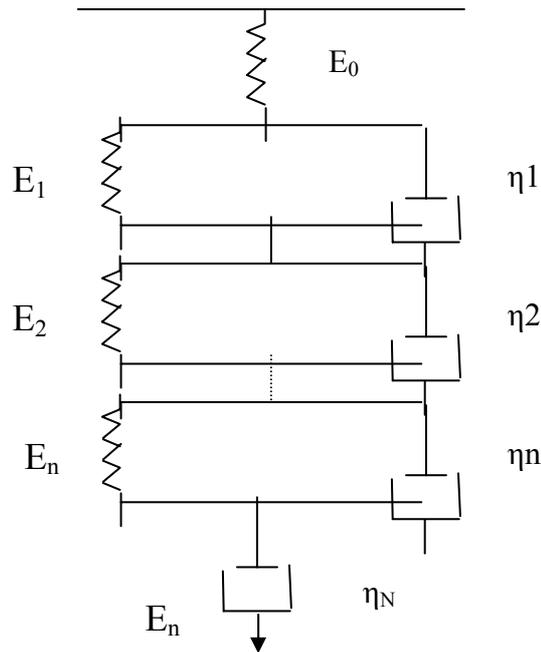


Fig.2.9. Representación mecánica del modelo de Kelvin generalizado

En la figura 2.9, el resorte representa la elasticidad retardada, los “ n ” elementos de Kelvin rigen la deformación retardada y el “amortiguador” η , da cuenta del flujo newtoniano final.

La relación $\varepsilon(t)$ para un elemento sometido a esfuerzo constante es:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[1/E_0 + 1/E_{\lambda_1} \left(1 - e^{-t/\lambda_1} \right) + 1/E_{\lambda_2} \left(1 - e^{-t/\lambda_2} \right) + \dots + 1/E_{\lambda_n} \left(1 - e^{-t/\lambda_n} \right) + t/\eta_0 \right] \quad (31)$$

Donde: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ son los tiempos de relajación de los diferentes elementos de Kelvin.

Modelo de Burgers o Modelo de los cuatro elementos

En otros materiales viscoelásticos sucede que al aplicar un esfuerzo constante se produce una deformación elástica instantánea seguida de una elástica retardada hasta que se establece un flujo newtoniano en el sistema (fig.2.10).

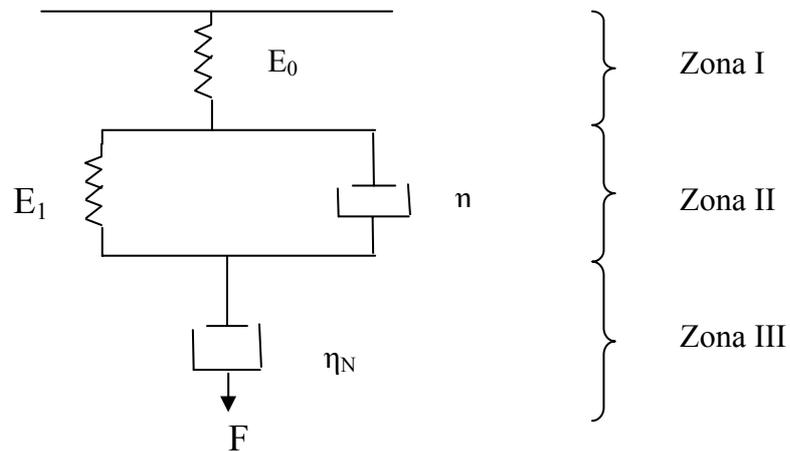


Fig.2.10. Representación mecánica del modelo de Burgers.

Al aplicar un esfuerzo constante se tiene el siguiente comportamiento:

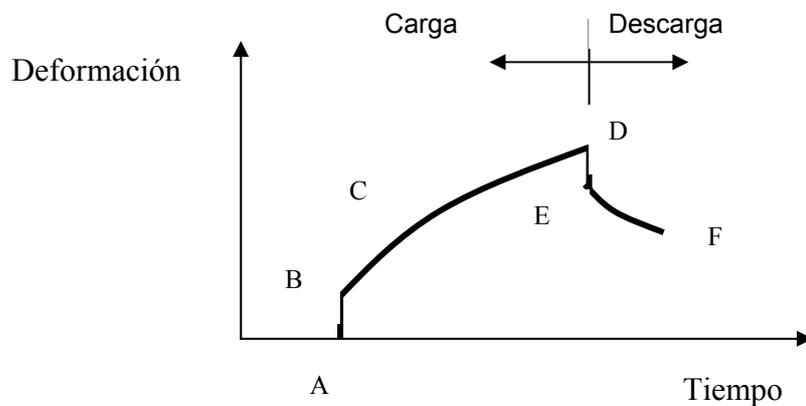


Fig.2.11. Curva reológica para el cuerpo de Burgers

Cuando se aplica la fuerza se produce una deformación inmediata (AB) debido al comportamiento elástico (Zona I). A continuación rige el modelo de Kelvin que determina el comportamiento (Zona II) y pasado un tiempo prudente, la deformación se debe al componente viscoso CD (zona III). Al retirar la carga, el componente elástico produce la recuperación instantánea DE y la

recuperación retardada EF se debe a la acción del elemento Kelvin (zona II). El conjunto de la recuperación instantánea y retardada se conoce por elasticidad total.

El modelo describe la relajación de materiales viscoelásticos pero es mucho más complicado que el de Maxwell generalizado.

Las deformaciones del sistema son: $\varepsilon = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III}$

El esfuerzo es el mismo en cada zona: $\sigma = \sigma_I = \sigma_{II} = \sigma_{III}$ y cumplen con las siguientes expresiones:

$$\sigma_I = E_0 \cdot \varepsilon_I \quad (32)$$

$\sigma_{II} = Er\varepsilon_{II} + \eta\varepsilon_{II}$ (33) corresponde a deformación elástica retardada.

$\sigma_{III} = \eta_v \varepsilon_{III}$ (34) corresponde a flujo newtoniano

Pruebas de relajación de esfuerzo

Este tipo de ensayo se basa en registrar las variaciones del esfuerzo con el tiempo cuando el material se somete a una deformación constante. En estos casos, el esfuerzo disminuye con el tiempo describiendo una curva general tal y como se presenta a continuación:

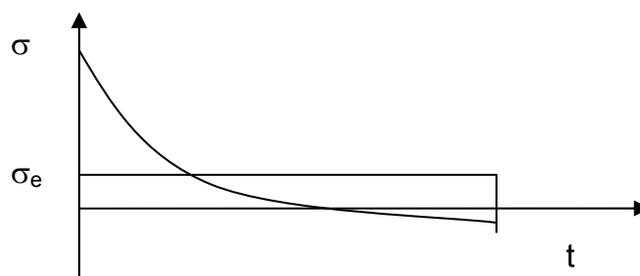


Fig.2.12. Curva de esfuerzo versus tiempo de un cuerpo viscoelástico

Este tipo de ensayo es uno de los más utilizados para caracterizar el comportamiento reológico (viscoelasticidad) de los alimentos sólidos.

De la observación directa se pueden extraer conclusiones cualitativas de las respuestas para diferentes materiales. Se pueden comparar velocidades y grados de relajación y visualizar el tipo de respuesta general.

Uno de los caminos directos para ello es averiguar si el material responde a un comportamiento maxwelliano generalizado:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(E_1 e^{-t/\lambda_{rel1}} + E_1 e^{-t/\lambda_{rel2}} + \dots + E_1 e^{-t/\lambda_{reln}} + Ee \right) \quad (35)$$

Lo cual se lleva a cabo a través del ajuste del modelo a los datos de $\sigma(t)$ vs. t mediante programas computacionales estadísticos. El análisis del resultado obtenido del coeficiente de determinación, el error estándar de la respuesta estimada y el análisis de los residuos del modelo, permitirá decidir acerca de las características predictivas de éste. Es obvio que mientras mayor número de elementos tenga el modelo escogido, mejor será el grado de ajuste de los datos, pero la tendencia generalizada es seleccionar aquel más simple.

Puede darse el hecho de que el material responda a un modelo maxwelliano simple, lo cual se comprueba representando gráficamente el logaritmo del esfuerzo en función del tiempo, entonces el resultado es una línea recta. El tiempo de relajación se calcula en estos casos como la pendiente de la recta.

Si no se dispone de esta técnica estadística novedosa, puede utilizarse el método de los residuos sucesivos (Castro, 1999).

Algunos ejemplos de los primeros trabajos prácticos realizados en productos alimenticios en relación a la interpretación de estructuras mediante la utilización de modelos mecánicos se presentan a continuación:

Morrow y Mohsenin (1966) han estudiado las frutas y vegetales como materiales viscoelásticos. Señalan que los productos agrícolas con alto contenido de agua se comportan muy cercanamente a los modelos mecánicos que se utilizan para presentarlos. Las celdas se acercan al comportamiento elástico mientras que el líquido celular representa el elemento viscoso en el modelo.

En las figuras siguientes se representan los modelos utilizados para describir el comportamiento de las manzanas Mc Intosh.

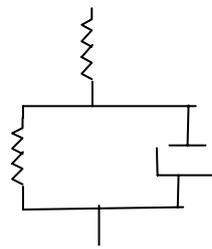
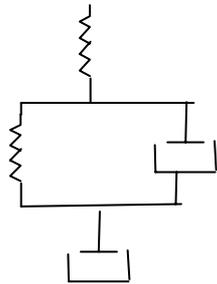


Fig.2.13 Modelo Burgers modificado **Fig.2.14 Modelo de tres elementos de Maxwell**

Los autores obtuvieron las curvas de relajación y capacitancia (creep) para las manzanas Mc Intosh por diferentes técnicas. Los resultados obtenidos indican que se comporta como viscoelástico y que los modelos se ajustan adecuadamente.

Sharma (1965) proponen un modelo mecánico de 6 elementos para caracterizar las propiedades viscoelásticas del helado congelado.

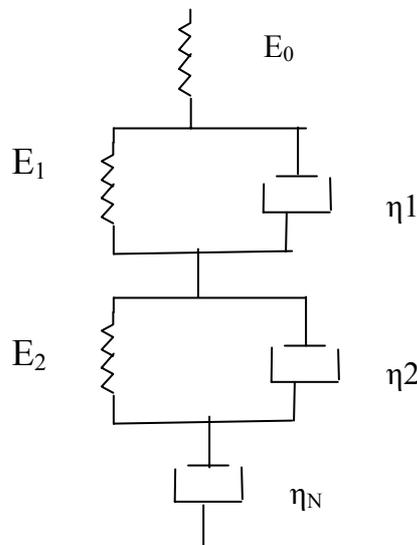


Fig.2.15. Modelo mecánico de seis elementos para el helado congelado.

Mientras que para el helado derretido el modelo se reduce a 4 elementos.

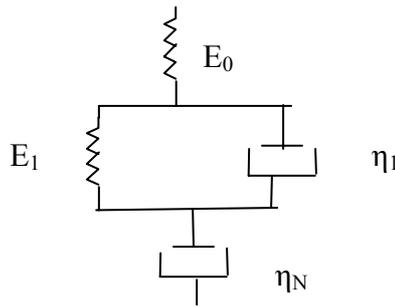


Fig.2.16. Modelo mecánico de 4 elementos para el helado derretido

Los autores establecen las siguientes relaciones entre los elementos del modelo y la composición: E_0 con los cristales de hielo; E_1 con las gomas estabilizantes; E_2 con la proteína que envuelve las burbujas de aire; η_1 con los cristales de grasa; η_2 con el gel estabilizador y la interfase de las burbujas; η_N con la grasa y los cristales de hielo.

Sato y Nakayama (1970) (citado por De Hombre, 1986) estudiaron las propiedades reológicas del músculo del pescado y carne de pollo. Para el primer caso un modelo con 7 elementos y para el segundo otro con cinco elementos representan el comportamiento de cada uno.

El modelo para la carne de pollo es del tipo Maxwell generalizado. Las pruebas reológicas incluyen mediciones del esfuerzo de ruptura. La energía de ruptura se utilizó como un índice de la calidad de la carne.

Elliot y Ganz (1971) (citado por De Hombre, 1986) han sugerido un cuerpo de Bingham modificado para representar las características reológicas de alimentos untuosos tal como mantequilla, margarina y quesos untables.

El modelo consiste de tres elementos en serie (cilindro y pistón, fricción y muelle). Cuando el modelo está en reposo y se somete a un esfuerzo, el muelle se estirará hasta que se exceda el esfuerzo límite. Después que se sobrepasa este esfuerzo, el elemento viscoso se moverá según su valor de la viscosidad plástica.

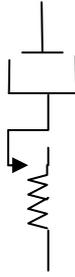


Fig.2.17. Modelo modificado de Bingham

Bloksma (1972) ha proporcionado un modelo muy útil para describir las propiedades reológicas de la masa de harina. Si se aplicara un esfuerzo repentino se produce una rápida deformación y después se hace más lenta. Cuando se elimina el esfuerzo, la muestra se recupera rápidamente y luego más lentamente. La deformación y recuperación instantánea se debe a la acción del muelle.

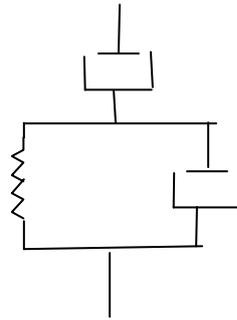


Fig.2.18. Modelo mecánico de tres elementos para masa de harina.

Leung y Col. (1983) (citado por De Hombre, 1986) estudiaron las propiedades reológicas de diferentes variedades de papas y obtuvieron las curvas de relajación del esfuerzo mediante una máquina Instron. Los autores encontraron que el modelo generalizado de Maxwell, que consiste de dos elementos viscosos y tres elementos elásticos se ajustaba a los datos obtenidos para las papas cocinadas. La ecuación calculada es la siguiente:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(E_0 + E_1 e^{-t/\lambda_1} + E_2 e^{-t/\lambda_2} \right) \quad (36)$$

Donde σ es el esfuerzo;
 t es el tiempo;
 ε_0 deformación constante;
 $\lambda_1 = \eta_1/E_1$; $\lambda_2 = \eta_2/E_2$

Siendo η_1 , η_2 las viscosidades y
 E_0 , E_1 , E_2 los módulos elásticos.

Normalización y linealización de los datos de las pruebas de relajación.

Peleg (1976) ha indicado una forma muy utilizada en la actualidad para interpretar las curvas de relajación: propone normalizar y linealizar las curvas de relajación y señala que una representación matemática ideal de un fenómeno físico está basado en las consideraciones siguientes:

- a. El número de constantes debe ser mínimo.
- b. Las constantes y los términos de la ecuación deben tener significado físico.
- c. La ecuación es sensible a los cambios físicos en el sistema, pero es insensible a parámetros arbitrarios.
- d. La expresión matemática debe ser lo más simple posible.

La representación generalizada de las curvas de relajación para los diferentes sistemas se presenta a continuación:

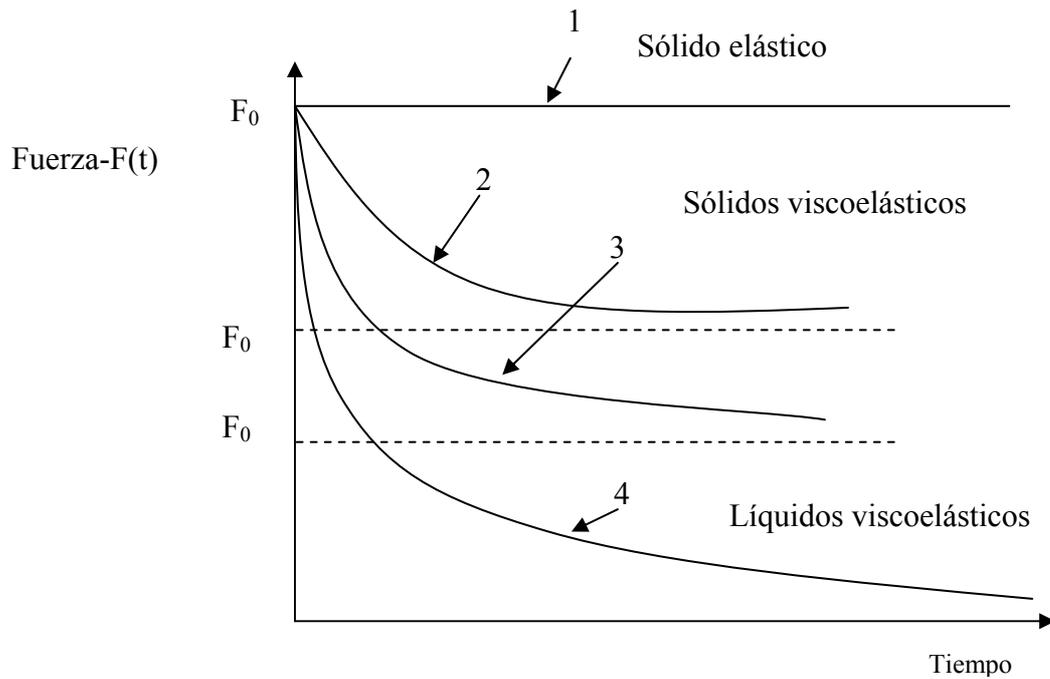


Fig.2.19. Curva de relajación de sólidos elásticos, sólidos viscoelásticos y líquidos viscoelásticos (Peleg, 1979a)

En general puede decirse que, el fenómeno de relajación de esfuerzos de un sólido puede describirse por la expresión:

$$E(t) = E_0 + f_1(t) \quad (37)$$

Y para un líquido:

$$E(t) = f_2(t) \quad (38)$$

Donde $E(t)$ es el módulo de decaimiento después del tiempo t , E_0 es el módulo en el equilibrio y $f_1(t)$ y $f_2(t)$ son las funciones de decaimiento del tiempo caracterizados por la propiedad de que a $t \rightarrow \infty$, $f_1(t)$ y $f_2(t) \rightarrow 0$.

Normalización de las curvas de relajación.

Las curvas de relajación pueden normalizarse mediante la ecuación siguiente:

$$Y = \frac{F_0 - F(t)}{F_0} \quad (39)$$

Donde:

$F(t)$: Fuerza a t minutos de relajación.

F_0 : Fuerza a $t = 0$ de relajación

Si se representa gráficamente la función $Y(t)$ vs. t , las formas de las curvas anteriores serían las siguientes:

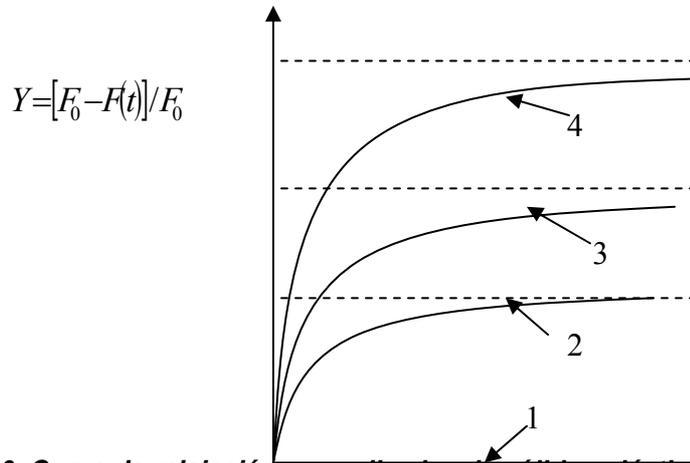


Fig.2.20. Curva de relajación normalizadas de sólidos elásticos (1), sólidos viscoelásticos (2 y 3) y líquidos viscoelásticos (4), Tiempo

Un análisis de la función $Y(t)$ vs. t sugiere que su expresión matemática pueden tener la forma siguiente:

$$Y(t) = \frac{abt}{1 + bt} \quad (40)$$

Siendo a y b constantes

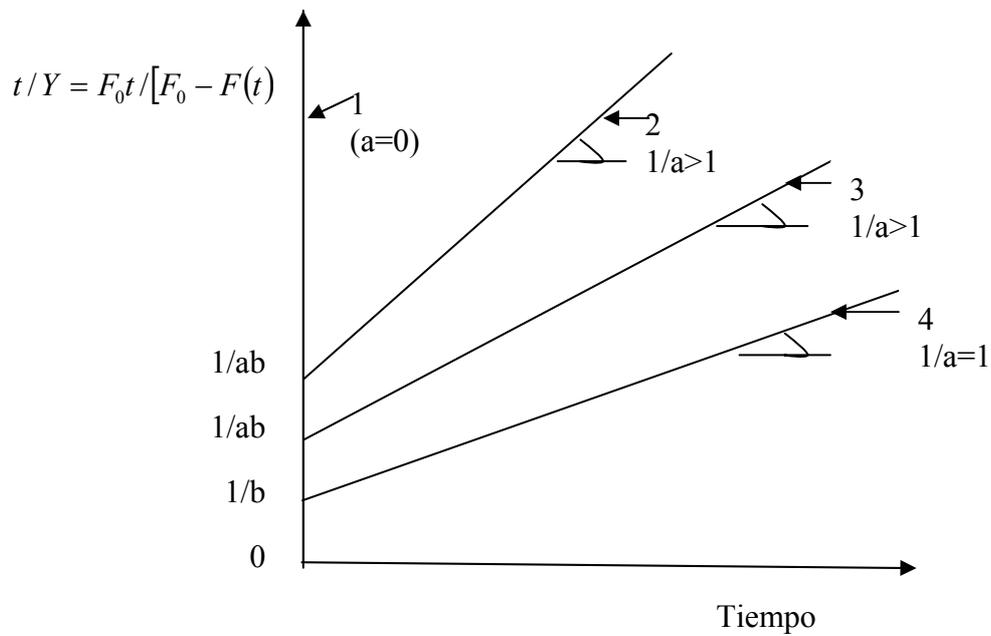


Fig.2.21. Curva de relajación linealizada de sólidos elásticos (1), viscoelásticos(2y3) y líquidos viscoelásticos(4)(Peleg,1976).

La constante “a” (adimensional) representa el nivel al que el esfuerzo cae durante la relajación. Si $a = 0$ el esfuerzo no se relaja (sólido) y si $a = 1$ el esfuerzo llega al valor cero (líquido). Para valores $0 < a < 1$, la constante “a” presenta el valor asintótico residual de $Y(\infty)$.

La constante b (1/min) representa la velocidad a la cual el esfuerzo se relaja ($1/b$) y es el tiempo necesario para alcanzar el valor $\frac{a}{2}$. Si $b = 0$ el esfuerzo no se relaja totalmente (sólido elástico ideal). En términos de la curva de relajación un valor elevado de “b” indica un descenso más marcado de la curva de relajación al valor residual.

Una curva de relajación típica linealizada para geles es la siguiente:

$$\sigma_0 \cdot t / [\sigma_0 - \sigma(t)] (s)$$

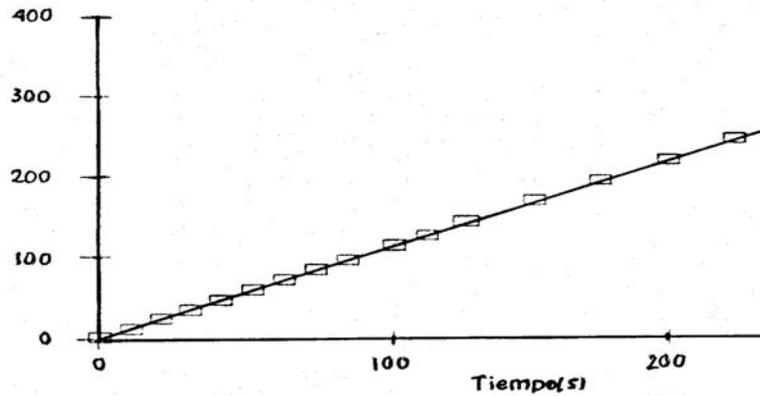


Fig. 2.22. Curva típica de linealización de Peleg (Nussinovich y col., 1990).

Con $\sigma_0=F_0/A$ y $\sigma(t)=F(t)/A$

Otra forma de lograr la normalización y linealización de los modelos maxwellianos es a través del uso de la expresión de Finkowski y Peleg (1981):

$$\frac{F_0 t}{F_0 - F(t)} = k_1 + k_2 t \quad (41)$$

Donde F_0 es la fuerza al tiempo cero, $F(t)$ es la fuerza al tiempo “ t ” y k_1 y k_2 son constantes.

Un gran número de alimentos y otros materiales pueden ser descritos por esta expresión. Sin embargo, la ecuación 41 representa una relación empírica. Su ventaja práctica, además de su simplicidad matemática, es que su aplicabilidad puede verificarse probando el ajuste de una relación lineal. Cuando esto ha sido establecido, los coeficientes de la ecuación serán independientes de la duración de la prueba en contraste con los modelos que contienen una serie de términos exponenciales.

El recíproco de k_1 (tiempo) indica la velocidad inicial de relajación y $1/k_2$ (adimensional) indica el valor asintótico o de equilibrio de $F_0 - F(t)/F_0$ y también representa la parte del esfuerzo que se relajaría después de un tiempo largo.

En el equilibrio hipotético alcanzado el módulo residual (no relajado) está dado por:

$$E_A = \frac{F_0}{A\varepsilon} \left(1 - \frac{1}{k_2} \right) \quad (42)$$

Donde:

A : área de la muestra perpendicular a la fuerza.

ε : deformación.

Pollak y Peleg (1980) y Finkowski y Peleg (1981) demostraron que E_A es una función de la deformación del alimento, especialmente con altas deformaciones producidas por compresión o tracción.

También se ha presentado que si $E_A = 0$ ($K_2 = 1$) el producto podría ser líquido ya que todo el esfuerzo se relajaría y que en los líquidos:

$$E(t) = f_2(t) \quad (43)$$

Donde:

$E(t)$: módulo de relajación al tiempo t .

$f_2(t)$: función de relajación al tiempo t , cuando $t = \infty$, $f_2(t) \rightarrow 0$

En este caso $E_0 = 0$ hay que recordar que E_0 es el módulo a $t = \infty$. Además:

$$f_2(t) = F_0 \left(1 - \frac{t}{k_1 + k_2 t} \right) \quad (44)$$

La conclusión opuesta que si $E_A \neq 0$ el material en estudio podría ser sólido tiene algunos inconvenientes, que se analizarán a continuación.

Si se hacen experimentaciones de relajación con tiempos muy cortos y se aplica:

$$\frac{F_0 t}{F_0 - F(t)} = k_1 + k_2 t \quad (45)$$

E_A no es un verdadero valor de E_0 que representa el módulo a tiempo infinito. En el caso $E_A \neq 0$ no se puede afirmar que el producto en estudio es sólido.

Debido a que los alimentos son materiales biológicos, y por ende inestables, a medida que pasa el tiempo se producen cambios físico-químicos, bioquímicos y microbiológicos, por lo que nos encontraríamos frente a un problema.

Peleg y Pollak (1982) han recomendado seguir los siguientes pasos en estos casos:

Se compara el estudio realmente medido después de 5 a 10 minutos con los valores asintóticos calculados a través de las relaciones:

$$\frac{F_0 t}{F_0 - F(t)} = k_1 + k_2 t, \quad E_A = \frac{F_0}{A \varepsilon} \left(1 - \frac{1}{k_2} \right)$$

y sería interesante además analizar si la relación $E(t)/E_A$ es función del tiempo o si también es función de la deformación. Si esta función es constante después de un determinado tiempo, este tiempo de relajación sería el adecuado.

Peleg y Pollak (1982) con los distintos alimentos ensayados establecen que el tiempo de relajación adecuado para sólidos sería de 10 minutos.

Cuando la razón $E(t)/E_A$ decae en función de la deformación tal como sucede con geles de agar y carragenina (Peleg y Pollak, 1982). Esto se debe a la sinéresis que presentan estos productos; en el caso de la deformación es una medida de la presión hidrostática del gel para expulsar el agua de su estructura, los jugos de frutas y tejidos pueden presentar el mismo comportamiento.

En estos casos donde se presenta exudación de líquidos en forma apreciable el valor absoluto del módulo residual es muy bajo, sea cual sea el método aplicado.

En las figuras siguientes se representan datos de diferentes alimentos.

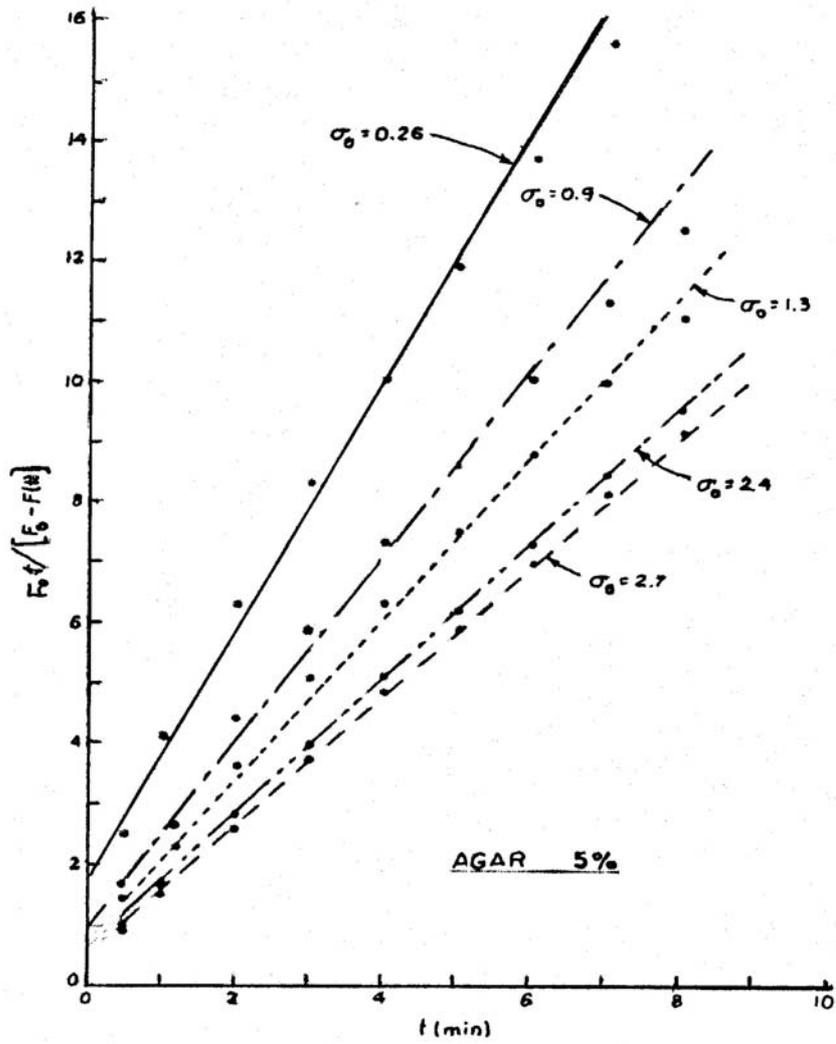


Fig.2.23. Curva de relajación normalizada de gel de agar(5%)(σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2)(Peleg, 1979b)

En la fig.2.23 se representan las curvas de relajación normalizada de gel de agar(5%) a distintos valores de esfuerzo aparente inicial y se puede comprobar que la curva de relajación normalizada representa bien el comportamiento del alimento.

En el caso de frutas, y en específico el de manzanas y peras, también se cumple el modelo de Peleg de la curva de relajación normalizada (fig.2.24 y fig.2.25).

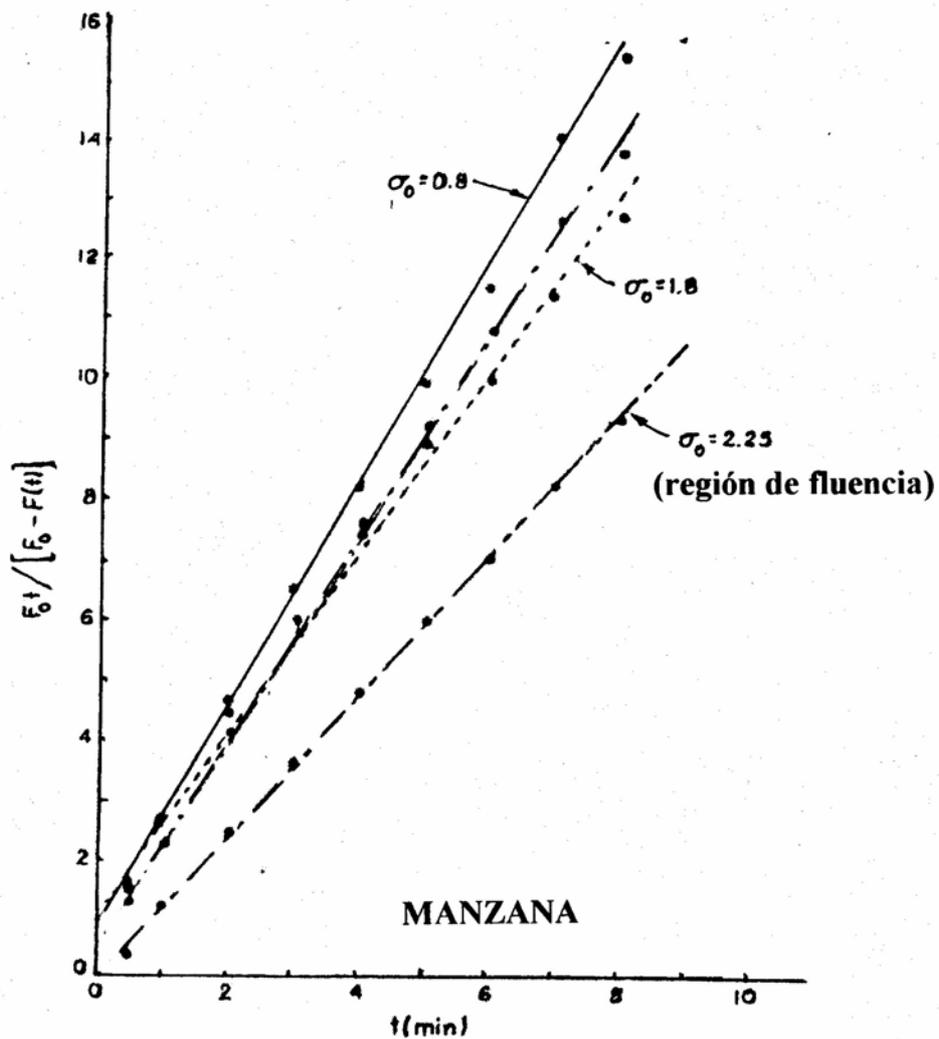


Fig.2.24. Curva de relajación normalizada de manzana (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2)(Peleg y Calzada, 1976)

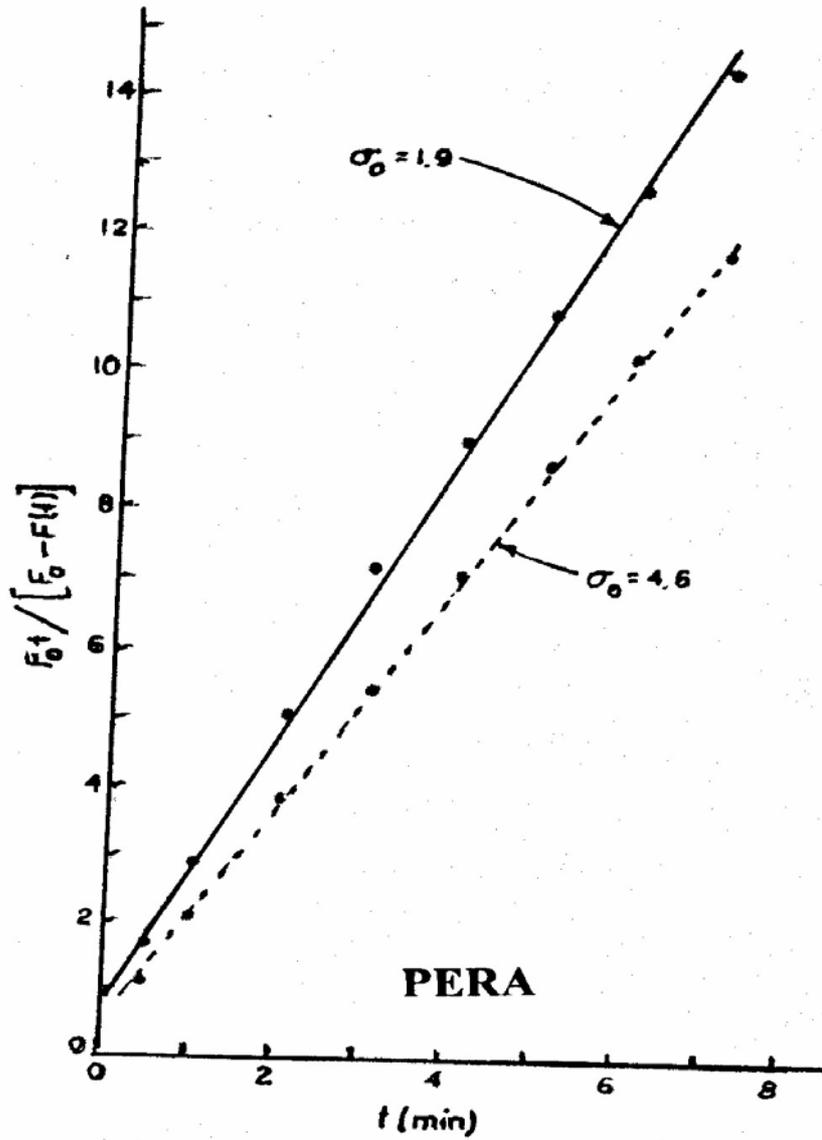


Fig.2.25. Curva de relajación normalizada de pera (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)

Para productos como el queso Cheddar, el modelo de la curva de relajación normalizada también representa muy bien el comportamiento (fig.2.26)

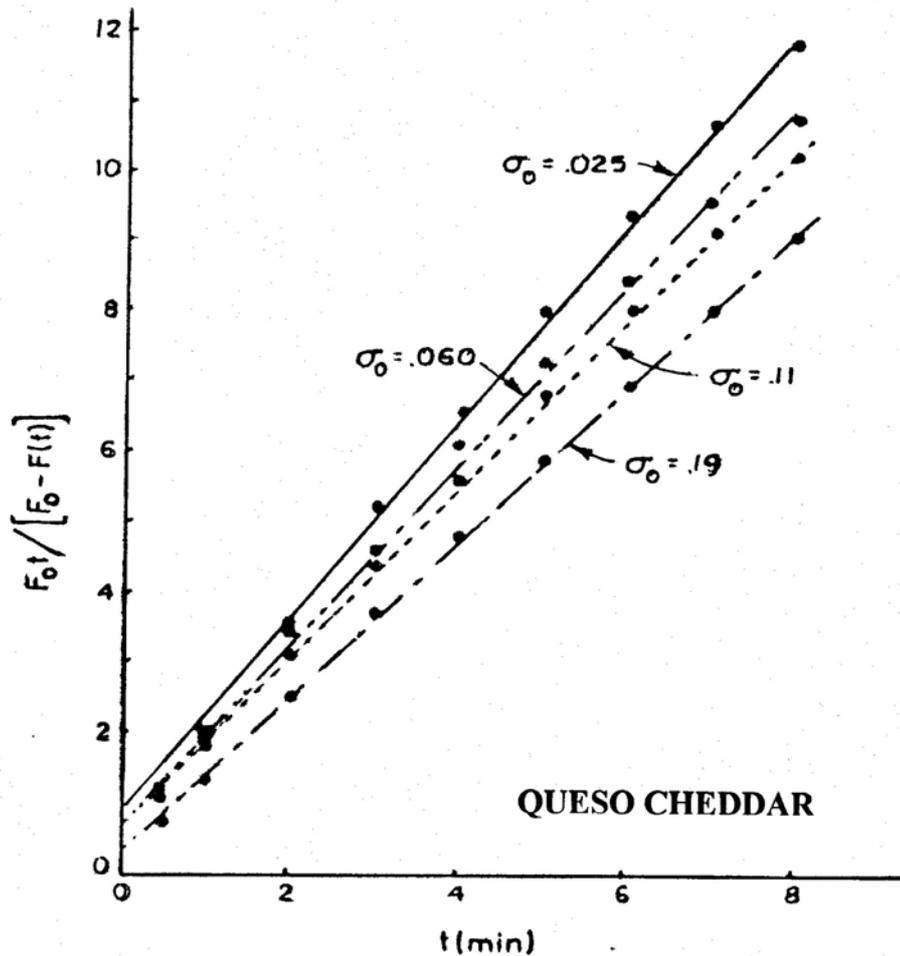


Fig.2.26. Curva de relajación normalizada de queso cheddar (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)

En el caso de tubérculos (papa), también el modelo de Peleg representa la situación. (fig.2.27)

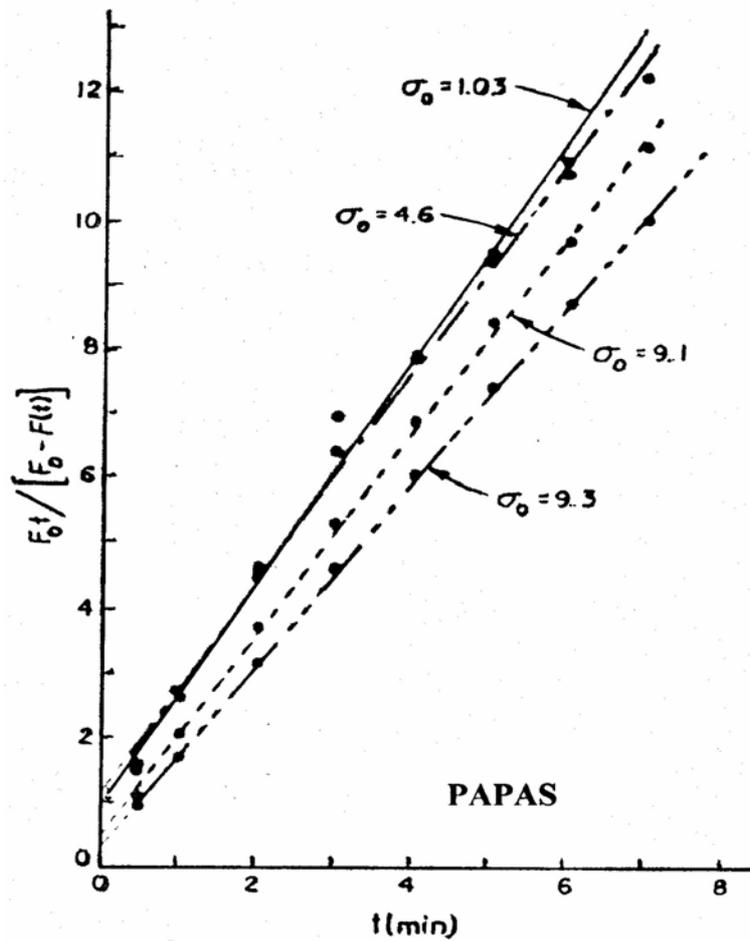


Fig.2.27. Curva de relajación normalizada de papa (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).

En productos de cecinería también el modelo de curva de relajación normalizada es un modelo excelente tal como en el caso de pan (fig.2.28)

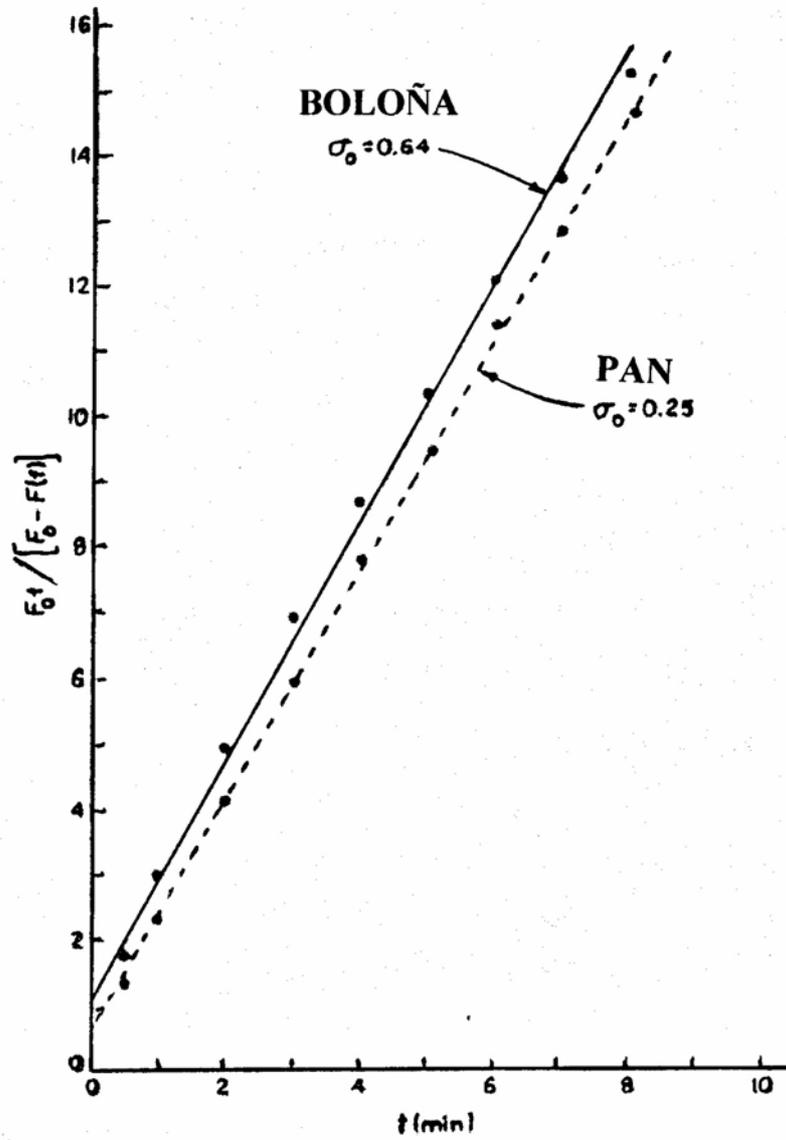


Fig.2.28. Curva de relajación normalizada de boloña y pan (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976)

En el caso de productos pastosos, tales como la pasta para fabricar productos embutidos como vienasas.

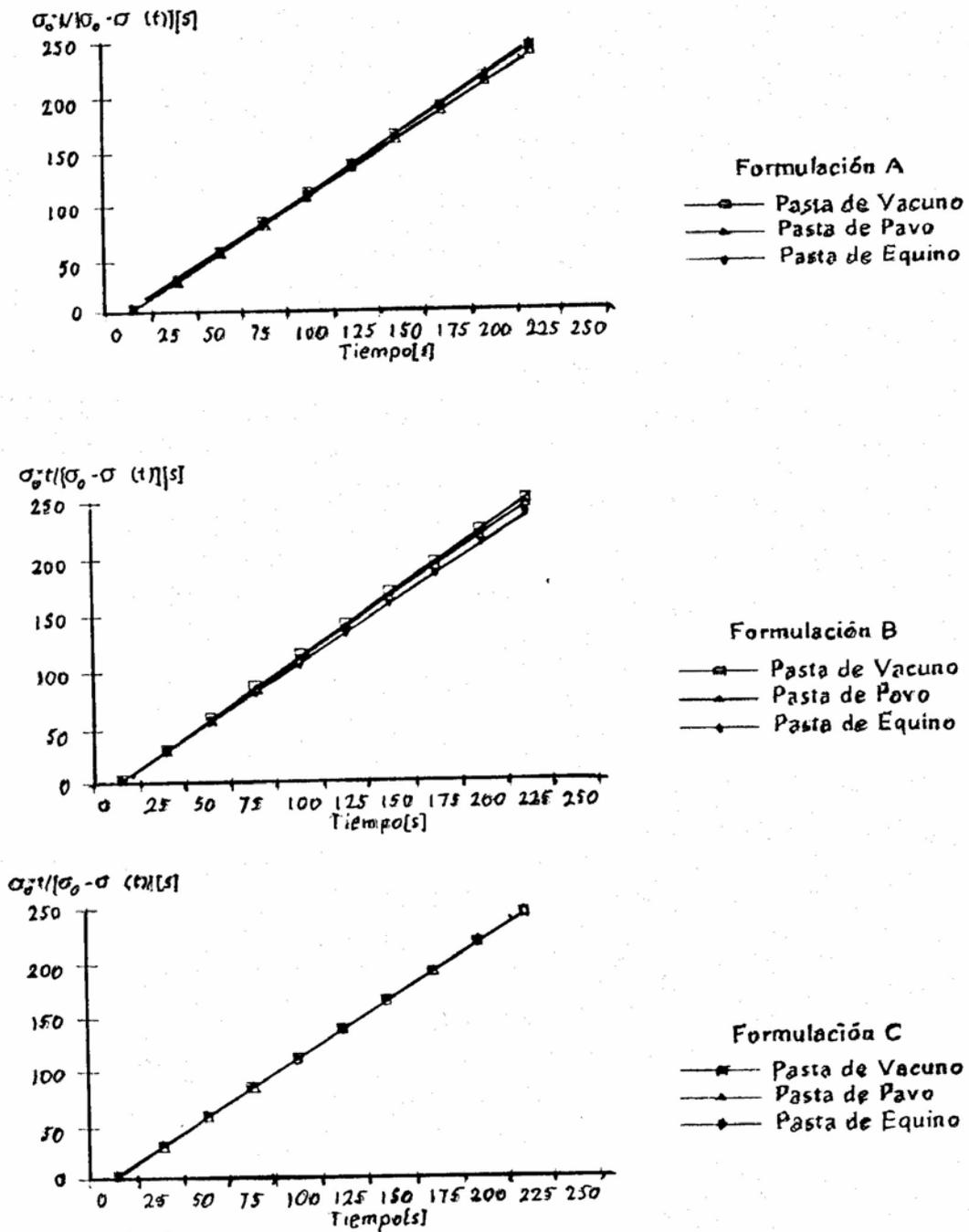


Fig.2.29. Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienasas a 28°C, altura inicial 9 mm (Castro, 1995).

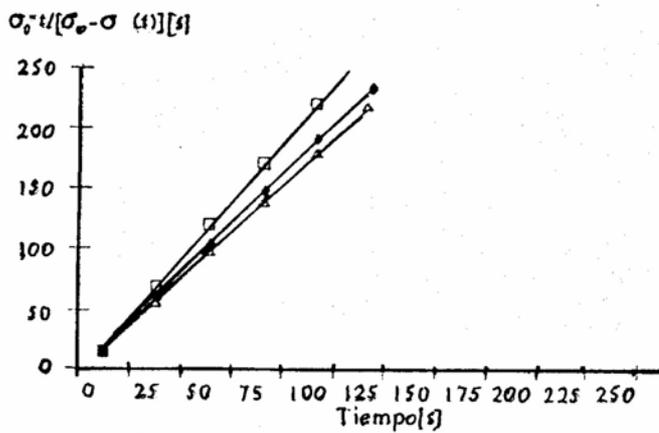
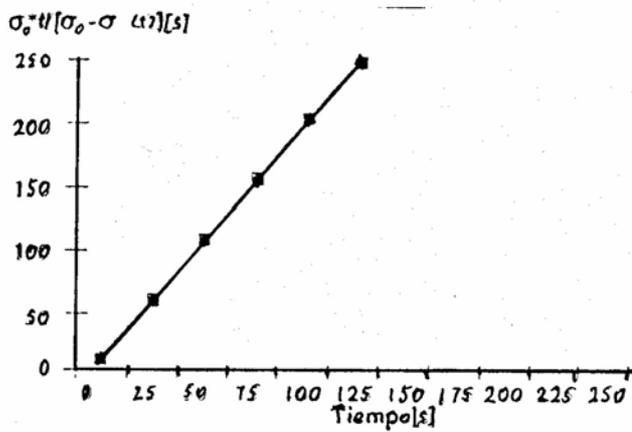
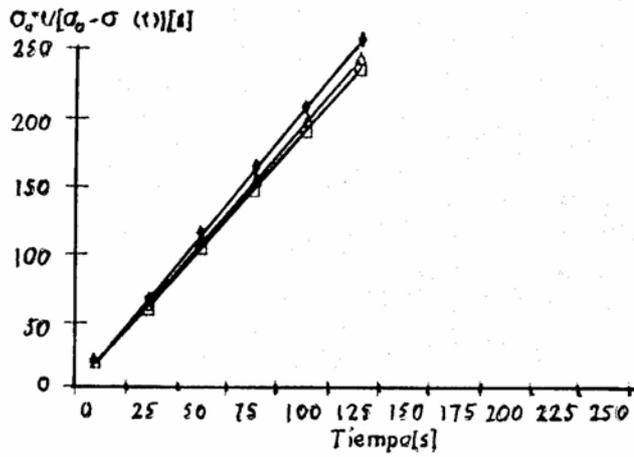


Fig.2.30. Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienesas a 28°C, altura inicial 20 mm (Castro, 1995).

En las fig. 2.29 y 2.30, se representan las curvas de relajación normalizadas con tres tipos de carne (vacuno, pavo y equino) y con tres tipos de formulaciones en que el contenido de proteína cárnica variaba entre ellas, todas ellas quedan muy bien representadas por el modelo de Peleg. Además se probó con dos alturas iniciales de la pasta, 9 y 20 mm, donde también el modelo de Peleg representa el comportamiento de la relajación.

En el caso de productos deshidratados tales como pasas deshidratadas osmóticamente y pasas sin deshidratar osmóticamente (Castro y col., 1997) al ser sometidas a relajación pueden ser normalizadas y linealizadas (Fig.2.31, 2.32 y 2.33).

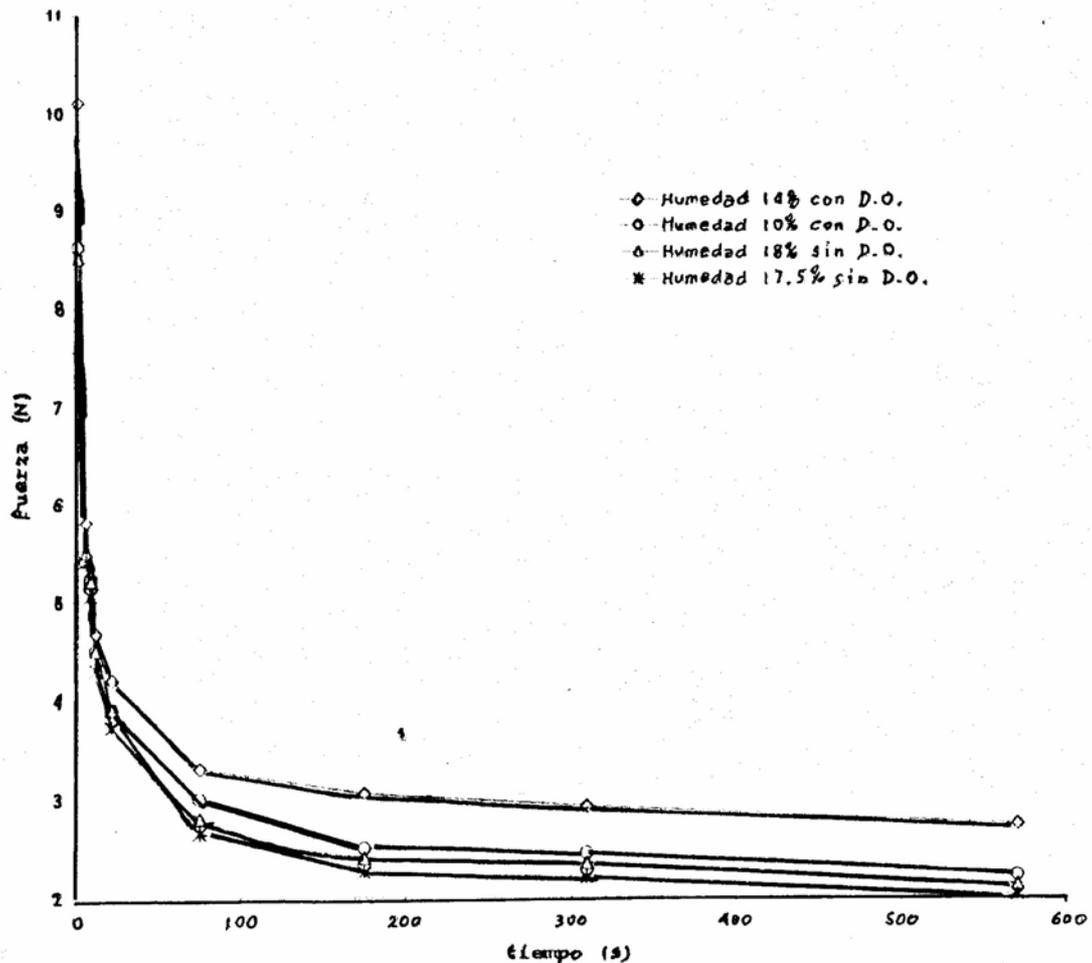


Fig.2.31. Curvas de relajación de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)

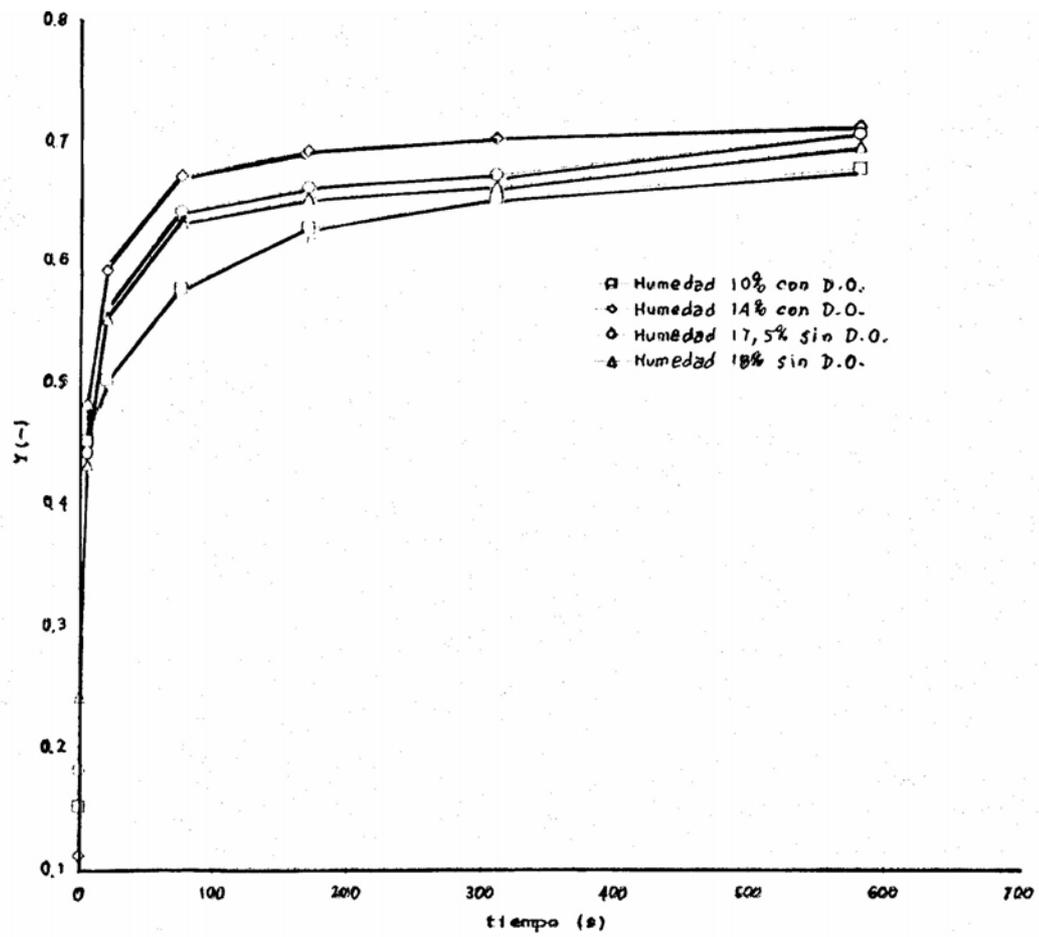


Fig.2.32. Curvas de relajación normalizadas de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)

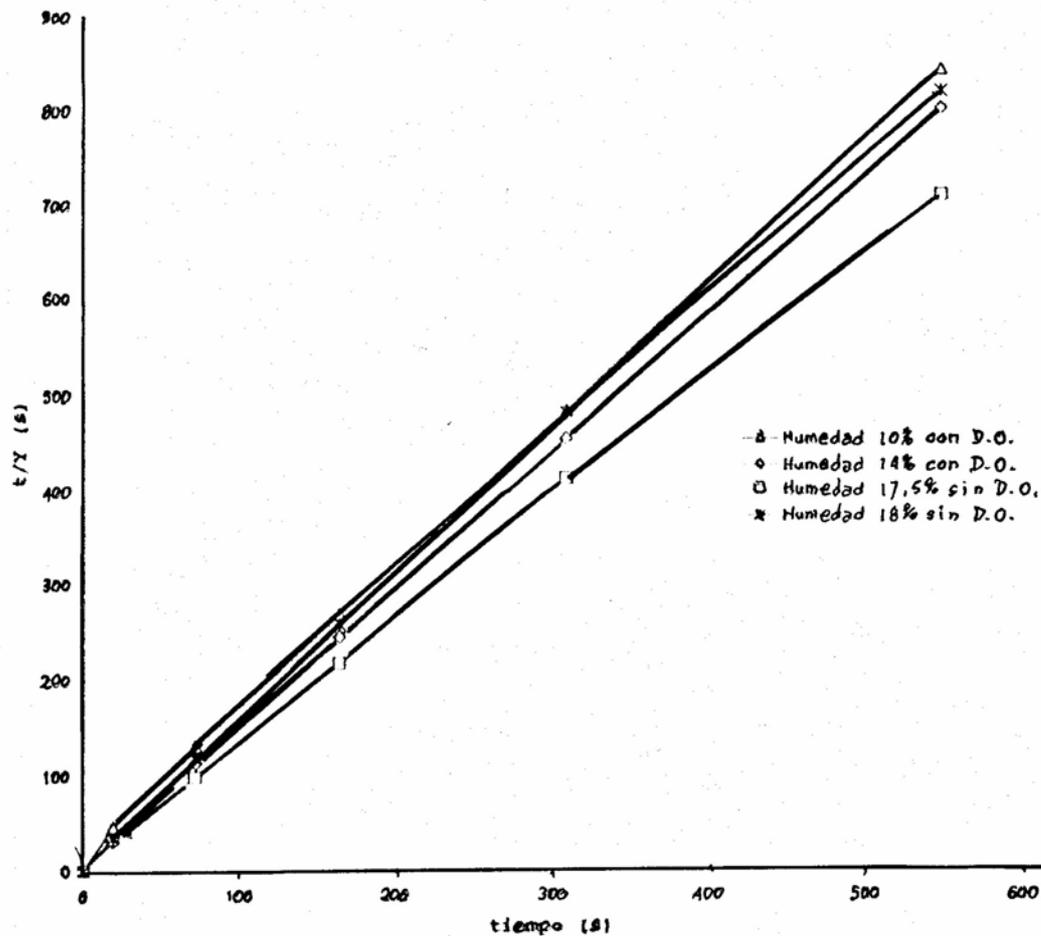


Fig.2.33. Curvas de relajación linealizada de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro y col., 1997)

Curva de relajación de geles

Las curvas esfuerzo-relajación de geles tales como las de muchos alimentos sólidos son descritas por:

$$E(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \exp\left(-\frac{\lambda}{\lambda_i}\right) \quad (46)$$

Que sería el tipo de modelo de Maxwell

Donde:

E: módulo de decaimiento, también puede ser el esfuerzo o la fuerza

a_i : coeficientes

λ_i : tiempo de relajación

Teóricamente la constante a_0 representa la cantidad de esfuerzo que permanece sin relajarse. Si $a_0 = 0$ todo el esfuerzo se relaja, aunque a velocidad decreciente y el material es un líquido.

Si $a_0 > 0$, existiría un esfuerzo residual, aunque el tiempo sea muy grande $\lambda \rightarrow \infty$, el material es considerado un sólido, y la magnitud a_0 indicaría la solidez del objeto ensayado. En los materiales viscoelásticos no lineales, la magnitud a_0 puede depender de la historia de la deformación a la cual ha sido sometido el material, y por lo tanto el material puede presentar diferentes grados de solidez a deformaciones diferentes.

Ya que los geles intercambian humedad con el ambiente y esto significa que no son físicamente estables, esto causa un problema en las medidas de relajación, ya que no se pueden utilizar tiempos largos.

Esto provoca, que el significado físico de a_0 sea sólo relevante en el tiempo de ensayo del gel, es decir que el comportamiento del gel (en tiempos cortos) es equivalente al de un sólido viscoelástico, con un módulo residual de magnitud a_0 (Nussinovitch y col., 1989).

Además, el cálculo de las constantes de la ecuación, que generalmente se realiza por ajuste de modelos y realmente dependen del tiempo del ensayo, los hace cuestionables desde el punto de vista de la explicación del comportamiento real del material.

En los polímeros líquidos, el problema se ha resuelto aplicando:

$$E(t) = b_1 \exp\left(-\frac{t}{100}\right) + b_2 \exp\left(-\frac{t}{10}\right) + \dots + b_4 \exp\left(-\frac{t}{0,1}\right) \quad (47)$$

Donde “b_i” son los coeficientes que son los que varían.

Este modelo ha sido propuesto para medir el comportamiento de sólidos. En este sentido, Miller y col. (1986) demostraron que las curvas de relajación utilizando modelos con dos o tres términos podrían explicar el comportamiento de los alimentos.

El problema con el módulo asintótico o de equilibrio puede ser enfrentado de la siguiente forma. Si la curva de relajación puede ser representada por el modelo linealizado de Peleg.

$$\frac{F_0(t)}{F_0 - F(t)} = k_1 + k_2 t \quad (48)$$

Entonces el módulo asintótico puede ser determinado mediante:

$$E_A = \frac{F_0}{A \cdot \varepsilon} \left(1 - \frac{1}{k_2} \right) \quad (49)$$

Donde:

A: área de la muestra

ε: deformación.

y la velocidad instantánea de relajación es:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{F(t)}{F_0} \right) = \frac{k_1}{(k_1 + k_2 t)^2} \quad (50)$$

Donde la velocidad inicial de relajación es 1/ k₁.

Por definición se conoce que el módulo de deformabilidad es:

$$Ed = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon H(t)} \quad (51)$$

$$\text{Donde: } \sigma(t) = \frac{F(t)[H_0 - \Delta H(t)]}{A_0 - H_0} \quad \text{y} \quad \varepsilon H(t) = \ln \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H(t)} \right)$$

Peleg (1979a), presenta la curva normalizada y linealizada de gel de agar al 5% de concentración (figura 2.34) y señala que la misma tienen interpretación física pero su utilidad está limitada si existen cambios significativos en la muestra durante los ensayos de relajación.

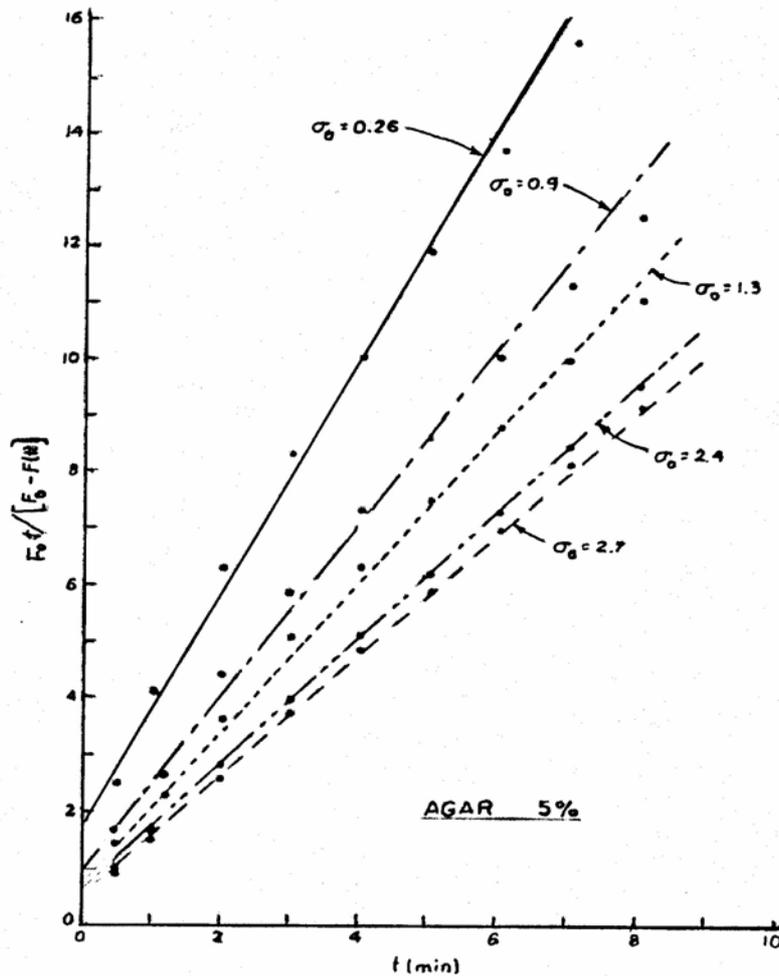


Fig.2.34. Curva de relajación normalizada de gel de agar (5%) (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg, 1979b)

Nussinovitch y col. (1989) realizaron un estudio de relajación de esfuerzos en una máquina Instron de geles de agar y alginatos y señalan que en la mayoría de los casos bastaría con tres o cuatro términos para describir las curvas experimentales de relajación.

Nussinovitch y col. (1990) en el ensayo de geles de gellano a diferentes concentraciones, han señalado que el módulo asintótico determinado por

pruebas de relajación presenta una estructura de “cedencia”, debido fundamentalmente a fenómenos de sinéresis, aspecto que será tratado más adelante.

En un trabajo más reciente Nussinovitch y col. (1990) prepararon geles de agar, k-carragenina y gellan y tomando muestras cilíndricas, lograron introducir azúcar por métodos difusivos para posteriormente deshidratar los geles. Estos se sometieron a ensayos de compresión en una máquina Instron hasta un 20% de su altura inicial. Obtuvieron los datos de esfuerzo-deformación y ajustaron un modelo empírico desarrollado anteriormente para sólidos (Peleg y col., 1989). Calcularon los parámetros de la regresión y concluyen señalando que dicho modelo resulta apropiado para describir la relación esfuerzo-deformación de los geles a pesar de que originalmente fue desarrollado para productos horneados blandos y espumas poliméricas.

Mukai y col. (1991), estudiaron las propiedades reológicas y las características de formar gel de Kefirano (polisacárido soluble en agua) producido por “*Lactobacillus kefiranofaciens*”, el kefirano está en el grano de kefir.

Las curvas de relajación de los geles (mezclas de kefirano, caseína, etanol) fueron obtenidos a 5° C utilizando el equipo Rheoner RE-3305.

La fuerza de gel del gel de kefirano aumenta fuertemente con el aumento de concentración. La fuerza de gel aumenta levemente con el aumento de la concentración.

La firmeza del gel de kefirano aumenta con la concentración de etanol, lo mismo sucede con el etilenglicol. La fuerza de ruptura de estos geles es menor que la de otros geles. Además el gel de kefirano en agua forma un gel rígido.

Las curvas de relajación de geles de kappa carragenina (1%) y kappa carragenina (0,5 %), fueron estudiados por Gamero y col. (1993). Los efectos de agregar azúcar (18,3; 36,6 y 55° Brix) y pulpa de fruta (15%) en la relajación fueron estudiados en este trabajo a dos niveles de deformación inicial 15 y 20 %.

Los modelos aplicados fueron el de Maxwell con 4 términos, la ecuación de Peleg con sus parámetros k_1 y k_2 , y el modelo modificado de Maxwell con los tiempos de relajación a 10 y 100 s.

$$F(t)/F_0 = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 \quad (52)$$

donde $X_1 = \exp(-t/10)$ y $X_2 = \exp(-t/100)$

C_0, C_1 y C_2 parámetros

Los investigadores encontraron que los tres modelos son válidos para estudiar los efectos de los cambios de composición en los geles lavados en carragenina. El modelo generalizado de Maxwell entrega más información básica mientras que el de Peleg y el modificado de Maxwell son más simples e igualmente adecuados para estudiar las curvas de relajación.

Concluyeron que las mezclas de carragenina pura de almendra de algarrobo y LBG (locus bean gum) presentaron más alta velocidad de relajación y menor elasticidad que los de carragenina pura.

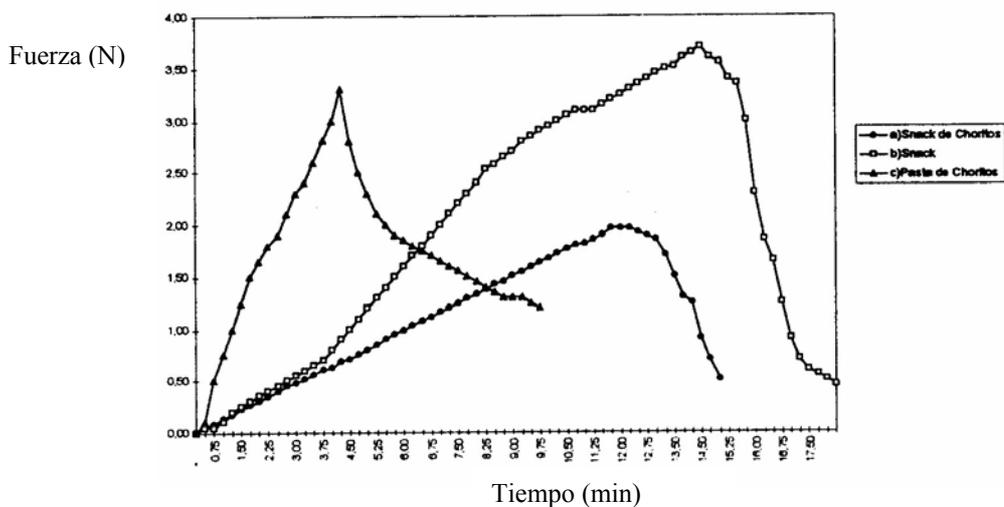
Al aumentar la concentración de azúcar disminuye la velocidad de relajación y hace que el material sea más sólido. El agregado de pulpa de fruta altera muy poco el comportamiento de relajación de los geles con alto contenido de sacarosa y los efectos dependen del tipo de hidrocoloide utilizado.

Los autores Mao y col. (2000) aplicaron el programa CONTIN que es un programa de uso general para invertir sistema algebraico lineal y ecuaciones integrables por medio de la transformación de Laplace.

Los geles estudiados fueron de gelano y kappa carragenina con agregado de Ca^{2+} (4, 6, 8, 14, 20, 30 y 40 mM de Ca^{2+}) a los geles de gelano y 8 mM de Ca^{2+} a los de carragenina.

Mao y col. (2000) concluyeron que el espectro de distribución de los tiempos de relajación podían alterarse por medio del análisis CONTIN de las curvas esfuerzo-relajación. También puede dar información respecto al mecanismo del esfuerzo de relajación en los geles. También encontraron que los resultados por CONTIN de las curvas de relajación están correlacionados a las propiedades de falla en las pruebas de compresión con respecto a la concentración de calcio de los geles de gelano.

En el caso de las curvas de relajación de snack de chorito (*Mytilus chilensis*) congelado, las fuerzas residuales afectan los valores ya que la curva de la fuerza aplicada en la línea media es menor que en el caso de la fuerza aplicada perpendicular a la línea media. En el caso de la pasta, la fuerza residual es mayor que en el caso de los snacks. En el caso de los snacks la relajación corresponde a la respuesta obtenida para un sólido.



- d. Curva relajación (fuerza-tiempo). Snack de choritos (fuerza aplicada en línea media)
- e. Curva relajación (fuerza-tiempo). Snack(fuerza aplicada perpendicular a línea media)
- f. Curva relajación (fuerza-tiempo). Pasta de choritos

Fig.2.35. Curva de relajación snack de chorito (*Mytilus chilensis*) congelado.(Castro y col., 1996)

Se estudiaron las curvas de relajación de muestras cilíndricas de papas tratadas con agua a 60, 70, 80 y 90° C, y tiempos de tratamiento hasta 80 min. El modelo fue el de dos elementos de Maxwell en paralelo.

$$\sigma(t) = E_3 \varepsilon_0 e^{\left(\frac{-tE_3}{\eta_3}\right)} + E_4 \varepsilon_0 e^{\left(\frac{-tE_4}{\eta_4}\right)} \quad (53)$$

En que E_3 , E_4 , η_3 y η_4 son parámetros a determinar y representaron la situación con R^2 variando entre 0,95 y 0,99. Los parámetros elásticos y viscosos fueron más sensibles que los determinados por ensayos de compresión axial y radial. Los parámetros seguirían una cinética de degradación de primer orden debido al ablandamiento térmico (Solomon y Jindal, 2003).

Purkayastha y Peleg (1986) encontraron similitud y concordancia entre los resultados de (creep) capacitancia y relajación, esto indica que hay factores significativos que juegan un papel similar en ambos tipos de ensayos se podría ampliar la idea que las condiciones de equilibrio mecánico son regidas por los mismos artefactos estructurales.

La linealización de Peleg (1979a) del tipo:
$$Y(t) = \frac{1}{ab} + \frac{t}{b} \quad (54)$$

Se aplicó a tres formulaciones de vienas con alto, medio y bajo contenido de proteínas (la formulación alto no tenía proteína de soya), la carne magra utilizada fue de equino. El procedimiento de fabricación fue el habitual de la mediana y pequeña industria chilena. Los resultados indicaron que los valores de “a” estuvieron entre 0,5-0,66 aumentando con el aumento de proteína y los valores de “b” aumentaron de 0,023 a 0,048. Ambos valores paramétricos permiten catalogar a las vienas como un sólido ($0 < a < 1$) con una velocidad de relajación bajo. Esto concordó con los datos de Ker y Toledo (1992) que ensayaron vienas con aislado proteico de suero. Este modelo dio el análisis más claro y la información más valiosa y es el que mejor se correlaciona con el contenido proteico (Castro y col., 1995).

Se realizaron las curvas de relajación a dos marcas de queso mantecoso chileno (Castro y Alvarez, 2002) y de la aplicación del modelo de Maxwell generalizado:

$$\sigma = \sigma_e + (\sigma_0 + \sigma_e)e^{-t/\lambda_{rel}} \quad (55)$$

donde

σ : esfuerzo kPa

σ_e : esfuerzo en el equilibrio, kPa

σ_0 : esfuerzo inicial (maximo), kPa

λ_{rel} : tiempo de relajación estimado, s.

Se obtuvieron valores, que al ser analizados estadísticamente mediante análisis de varianza múltiple se obtuvo que cada lote tenía distintos tiempos estimados de relajación sin embargo no se presentó diferencias significativas ($P > 0,05$) entre marcas ni entre muestras.

Las curvas de relajación de vienasas con alto, medio y bajo contenido de proteínas (la formulación alto no tenía proteína de soya) y la carne magra utilizada de equino, fueron estudiadas por Castro y col. (1995). El procedimiento de fabricación fue el habitual de la mediana y pequeña industria chilena. La velocidad de deformación aplicada fue de 10 m/s y la de la mayoría de los autores fue de 1 m/s.

Las curvas en general fueron del tipo de las mostradas en la figura siguiente.

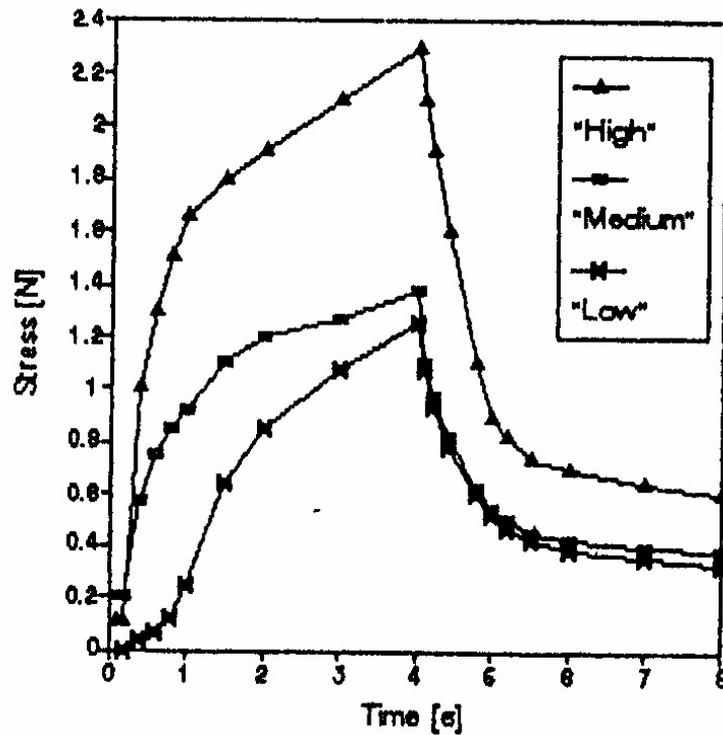


Fig. 2.36. Representación esquemática del modelo de Maxwell generalizado con los elementos para representar comportamientos de fluencia y compresión cuando estos varían con la deformación (Peleg y Normand, 1982)

En esta figura claramente se distingue la de alto contenido de las de medio y bajo, pero entre estas dos últimas no es claro distinguir entre medio y bajo en la parte de relajación.

Saldo y col. (2000) estudiaron las curvas de relajación de queso de cabra en procesos de alta presión hidrostática para acelerar su maduración en que aplicaron las presiones siguientes: 50MPa por 72 h (A), 400 MPa por 5 min (B) y 400 MPa por 5 min seguido por 50MPa por 72 h (C).

Aplicaron el modelo de Maxwell generalizado de 5 elementos con un resorte E_{00} en serie con un arreglo en paralelo de dos resortes E_1 y E_2 , cada uno en serie con amortiguadores η_1 y η_2 , que es representado por:

$$\frac{F(t)}{A - \varepsilon} = E_{00} + E_1 e^{(-t/\tau_1)} + E_2 e^{(-t/\tau_2)} \quad (56)$$

Donde:

A: área de compresión.

ε : es la deformación verdadera en la prueba de relajación.

E_{00} : es el módulo de equilibrio del módulo elástico.

E_1, E_2 : módulos elásticos

τ_1, τ_2 : tiempos de relajación.

Encontraron que los valores de los elementos elásticos fueron mayores y los tiempos de relajación más largos para postratamientos B y C que para el control y A.

Los tiempos de relajación los relacionaron con los coeficientes de viscosidad en el modelo de Maxwell.

$$\eta_i = E_i \cdot \tau_i \quad (57)$$

Los resultados pueden ser ajustados a una fuerza adimensional, normalizada respecto a la fuerza inicial como sugiere Peleg (1979a)

$$f(t) = \Delta F(t)/F(0) = ct^n \quad (58)$$

El coeficiente de correlación fue $R^2 = 0,91$.

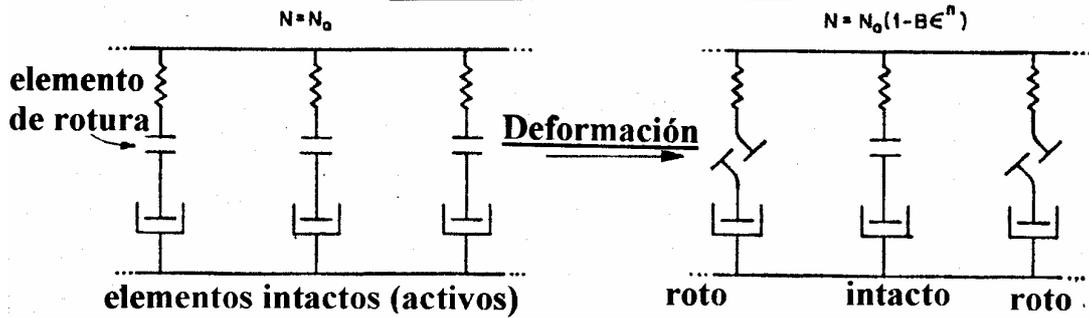
La correlación al utilizar el modelo de la potencia anterior es más pobre que la del modelo de Maxwell pero es muy adecuada para ser utilizada.

El tratamiento A no fue diferente del control, pero el B y el C presentaron mayor valor de C y menor valor de η que el control. Esto significa que los quesos con el tratamiento B y C están más cerca del comportamiento de fluido que de sólido.

Influencia de diversos factores en los resultados de las pruebas de relajación

Peleg y Normand (1982) desarrollaron un modelo mecánico para alimentos que presentan fluencia, tal como el queso, donde el número de elementos disminuyen continuamente y otro para aquellos casos donde el número de elementos aumenta continuamente (compresión), tal como el pan. La representación de ambos se muestra en la siguiente (figura 2.37).

MODELO DE FLUENCIA



MODELO DE COMPRESIÓN

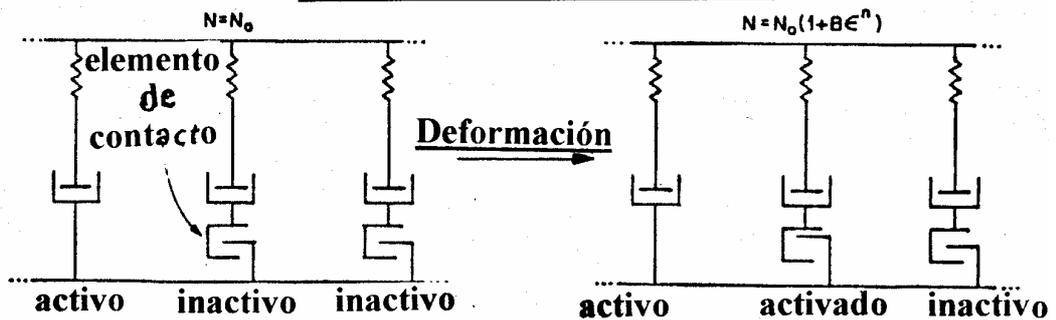


Fig. 2.37. Representación esquemática del modelo de Maxwell generalizado con los elementos para representar comportamientos de fluencia y compresión cuando estos varían con la deformación (Peleg y Normand, 1982)

Ambas situaciones pueden representarse de la siguiente forma:

Materiales con fluencia $N = N_0(1 - B\varepsilon^n)$

Materiales con compresión $N = N_0(1 + B\varepsilon^n)$

Donde:

N : número de elementos de Maxwell activos a la deformación ε

N_0 : número inicial de elementos

B, n : constantes.

Para el caso de fluencia, la simulación de las relaciones esfuerzo-deformación, estas funciones con $n = 2$ se aplican a un elemento de Maxwell

σ_M

con el elemento de ruptura σ_c tal como se presenta en la figura 2.38, con lo que se obtiene la ecuación siguiente:

$$\sigma(\varepsilon) = N(\varepsilon) \sigma_M \left(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \lambda, \sigma_c \right) \quad (59)$$

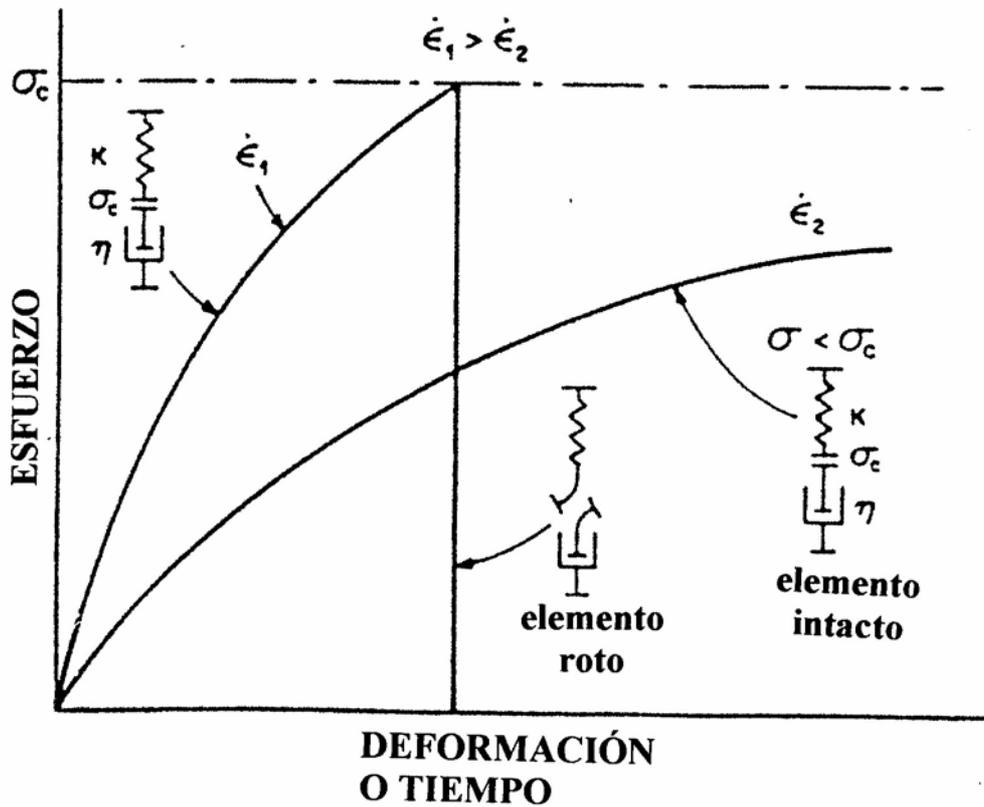


Fig. 2.38. Esquema del modelo de compresión utilizado para el estudio (Peleg y Norman, 1982)

Para el caso de compresión al estudiar el efecto elástico la deformación es:

$$\sigma(\varepsilon) = N_0 [x \cdot K_E \cdot \varepsilon + (1-x) \sigma_M] \quad (60)$$

Donde:

x: fracción de elementos elásticos

K: constante del resorte

Lo cual se representa en la figura 2.39.

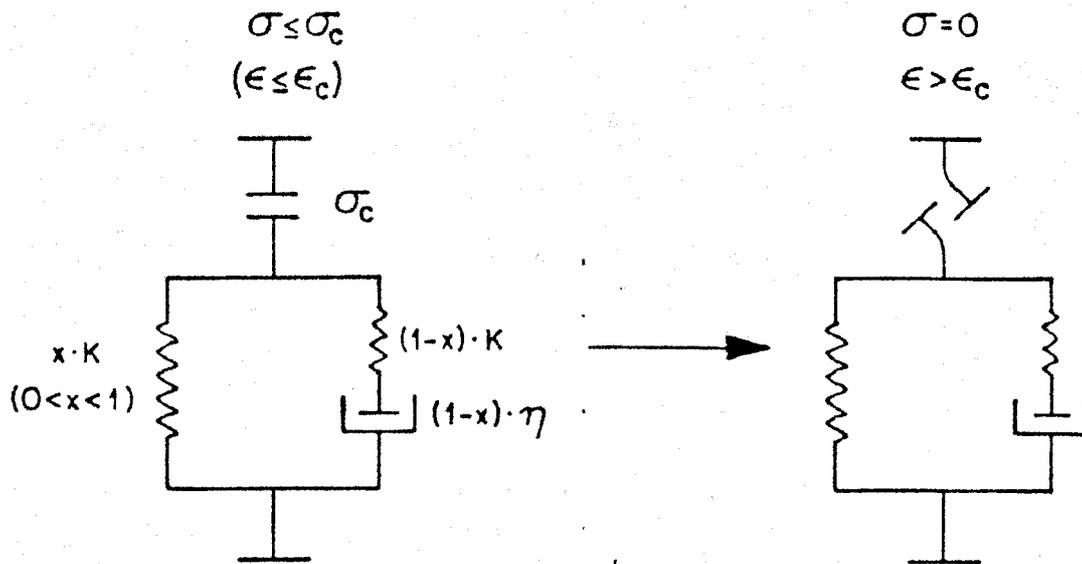


Fig. 2.39. Esquema del modelo utilizado para el estudio (Peleg y Normand, 1982)

El comportamiento viscoelástico de vienesa fue estudiado por Castro y col., (1995) por medio de curvas de relajación para alto, medio y bajo (la formulación alta no tenía proteína de soya), la carne magra utilizada fue equino. El procedimiento de fabricación fue el habitual de la mediana y pequeña industria chilena.

Se aplicó el modelo de Maxwell generalizado con tres elementos más el resorte, los coeficientes obtenidos no presentaron tendencias ni correlación. El modelo de Maxwell describe bien la influencia del contenido de proteína, pero no son significativos debido que a pesar de tener altos valores de R^2 estos no cambian en función del contenido de proteína.

Sin embargo las curvas de relajación de un modelo de Maxwell de tres elementos se ajusta muy bien a los datos experimentales de alto medio y bajo contenido de proteína.

Curva de relajación de frutas y vegetales previamente deformados.

Peleg y Calzada (1976) plantean que los aspectos matemáticos de la tensión de relajación de sólidos agrícolas son tratados principalmente por modelos reológicos lineales y en especial el de Maxwell generalizado o arreglos simples que contienen un número pequeño de elementos. En general, esto implica que la curva de esfuerzo de relajación es función de la historia de deformación del sistema y de las magnitudes absolutas y relativas de las unidades constituyentes del modelo.

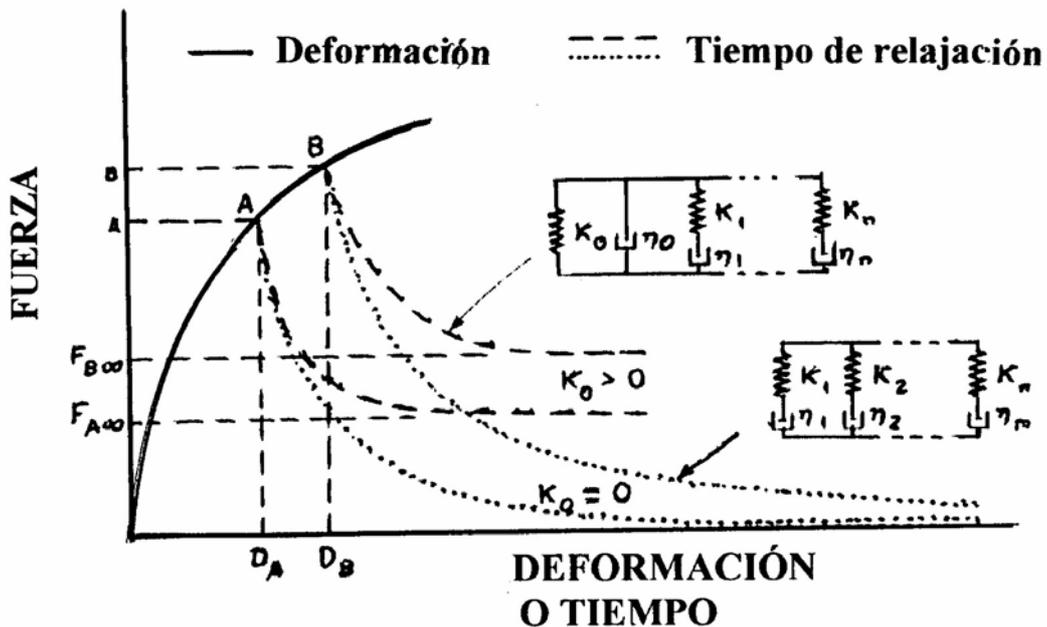


Fig. 2.40. Representación esquemática de las curvas de fuerza de relajación de modelos deformados de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976)

En la figura 2.40 se presentan las curvas de deformación previa a la relajación para dos cuerpos A y B y a continuación se presentan los cambios que podrían seguir dependiendo de los valores de la constante elástica del primer elemento de Maxwell generalizado y pueden presentarse dos situaciones: una que tienda a un valor asintótico en este caso a $F_{A\infty}$ y $F_{B\infty}$ (líneas de segmentos en la figura) o que tienda a valores nulos de fuerza (línea punteada en la figura). En la misma figura se presentan los modelos que explicarían esta situación.

De este análisis se puede concluir que después de un tiempo largo de relajación (t_{∞}) un cuerpo de Maxwell generalizado puede tender a dos valores de fuerza residual.

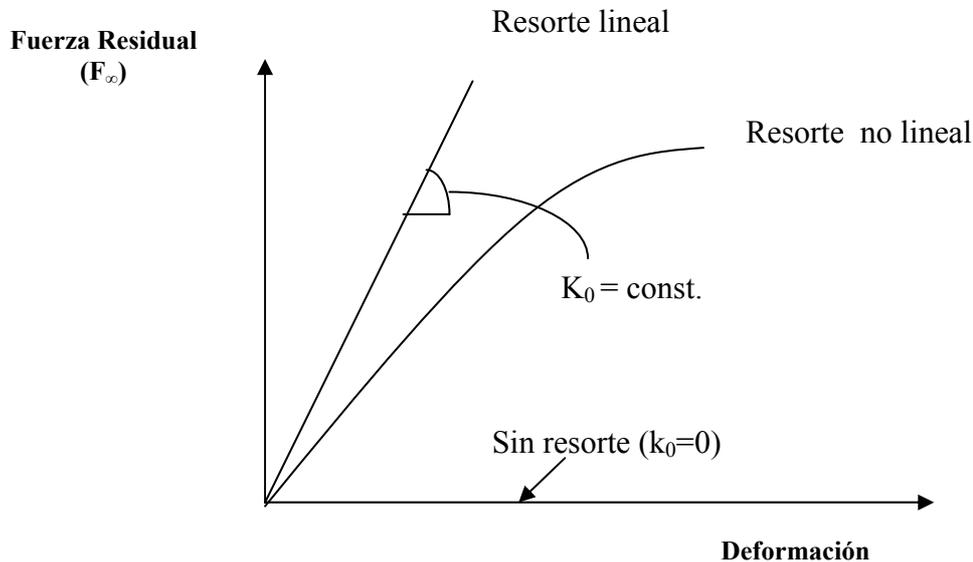


Fig.2.41. Relaciones entre fuerza residual (F_{∞}) y deformación de un modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976)

En el caso en que no haya resorte, es decir que $K_0=0$, la fuerza es igual a cero. Pueden presentarse situaciones en que K_0 es constante y que sea variable (fig. 2.41). Además si existe un elemento elástico paralelo al resto de los elementos de Maxwell, se representaría el caso de fuerza constante. La fuerza residual constante (F_{∞}), está determinada por el producto del módulo K_0 (fig. 2.41) del resorte libre por la deformación fijada inicialmente. También hay que aclarar que es función de la deformación y es independiente de la velocidad con que se logró dicha deformación. Si el resorte libre es no lineal, la fuerza residual sería una función no lineal de la deformación y seguiría independiente de la deformación.

Peleg y Calzada (1976) plantean que independientemente de la existencia o no del resorte paralelo a los elementos de Maxwell la posición de la curva de relajación está determinada por la fuerza inicial y la deformación fijada es decir, que independientemente de los elementos de Maxwell presentes en el modelo, la curva de relajación que parte de valores más altos de fuerza estará sobre otra que parte de valores más bajos (fig. 2.41).

En el caso de algunas frutas y vegetales las características de las curvas de relajación son consecuencias naturales del modelo reológico aplicado que no garantizan que sea el más adecuado, ya que sólo puede ser considerado como una aproximación cuantitativa limitada a los rangos condicionados de deformación. La falla de la aplicabilidad de los modelos es debido a que las frutas y vegetales son materiales biológicos que podrían no ser bien representados por los modelos existentes con un número fijo de elementos.

Para aclarar esto se revisará el caso general de deformación que principalmente consiste en tres etapas progresivas en que diferentes tipos de fenómenos mecánicos pueden jugar un papel dominante.

Las etapas a analizar son las siguientes:

- 1.- Una etapa en que no se produce ningún cambio físico permanente y la deformación es netamente elástica e independiente de la velocidad.
- 2.- La etapa en que se producen gradualmente cambios irreversibles. Esto puede incluir rupturas de tejidos o elementos celulares que inician reacciones enzimáticas.
- 3.- Etapa de ruptura o postruptura. Están caracterizadas por una ruptura física aparente del material y debiera discutirse como fenómeno de ruptura. Desde el punto de vista reológico el material todavía es viscoelástico, pero muestra comportamiento viscoelástico diferente si se compara con sus etapas de prerruptura.

En la realidad, el análisis reológico del fenómeno de deformaciones es bastante complejo, debido a que las estructuras no son uniformes y tienen grandes variaciones naturales.

Elementos de ruptura y pruebas de capacitancia.

En las pruebas de relajación la deformación es fija y el esfuerzo va variando y no se va a producir una nueva ruptura a menos que se haya producido durante la deformación inicial.

En el caso de pruebas de capacitancia la deformación aumenta con el tiempo y con la incorporación de un elemento de ruptura lo que sucede no puede ser explicado solo con el único criterio de esfuerzo según se ve en la figura siguiente.

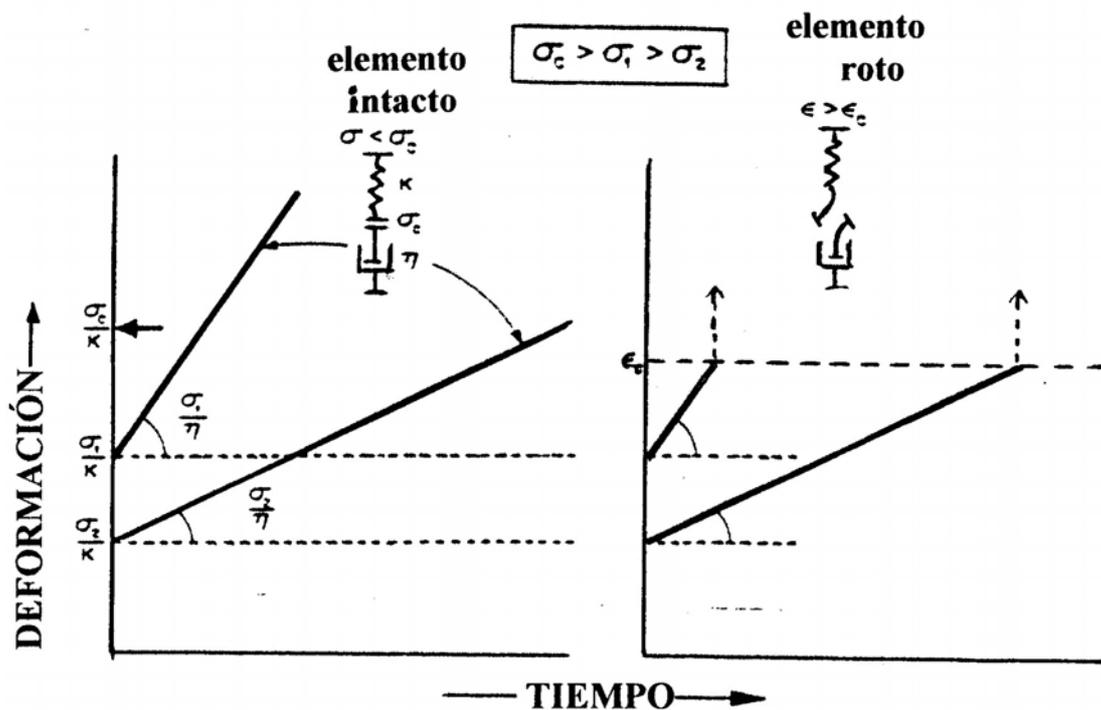


Fig.2.42. Curvas de creep de un elemento de Maxwell en serie con un elemento de ruptura; a la izquierda el criterio de rotura es la tensión crítica y a la derecha es la deformación crítica (Peleg, 1983), σ_1 , σ_2 son las tensiones constantes y σ_c es la tensión de rotura, ϵ_c es la deformación de rotura.

Combinación de elementos

Cualquier combinación de elementos produce modelos reológicos discontinuos en que al menos un elemento es instantáneamente eliminado o agregado a una determinada deformación o esfuerzo.

Cuando un modelo está constituido de un número definido de elementos con constantes identificables se habla de un modelo discreto y la discontinuidad se expresa en un cambio repentino de la pendiente de la relación esfuerzo-deformación o adquiere la forma de diente de sierra.

El primer caso se produce cuando el elemento inactivo está en serie con los otros elementos y el segundo caso se produce cuando los elementos están en paralelo.

Se analizará el modelo que está formado por elementos elásticos iguales en paralelo, el orden de activación está determinado por la razón de las constantes del modelo que se traduce en una relación esfuerzo deformación que sería diferente en términos de resistencia (esfuerzo de ruptura simulado) y tenacidad (área bajo la curva hasta la ruptura).

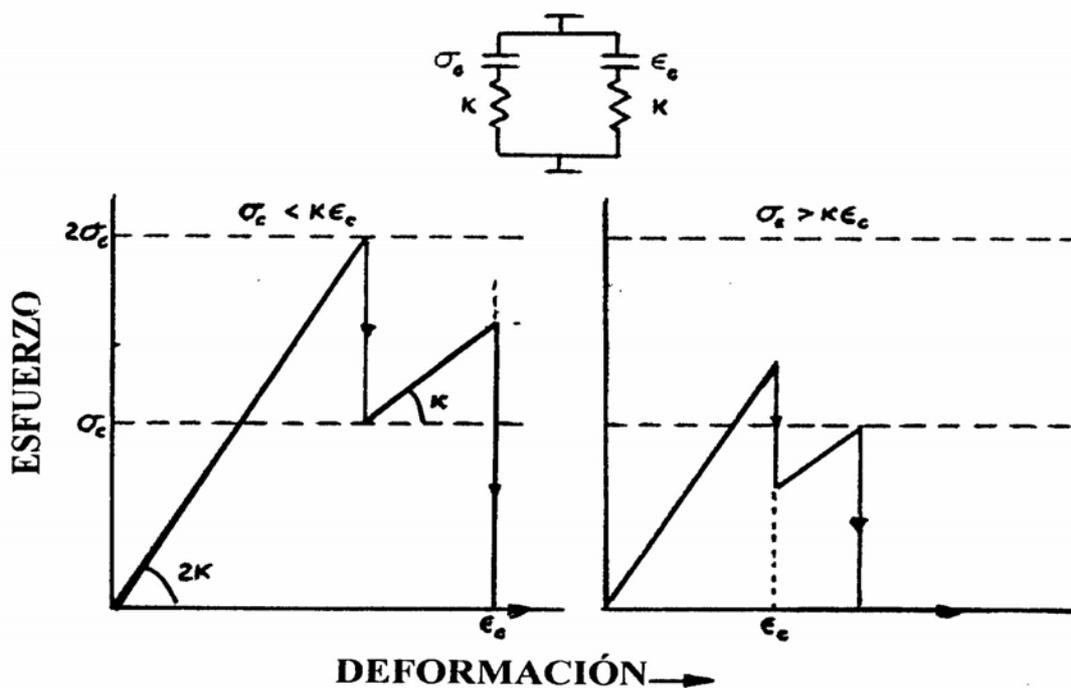


Fig.2.43. La relación de sierra entre el esfuerzo y la deformación de un modelo formado por dos elementos elásticos y de rotura con diferentes tipos de criterio de activación σ_c y ϵ_c (Peleg, 1983).

El modelo siguiente está formado por un modelo elástico en paralelo con uno maxweliano y cada componente tiene nivel de deformación de ruptura diferente (ϵ_{c1} y ϵ_{c2})

El comportamiento del modelo en las tres pruebas analizadas es mostrado en la figura siguiente.

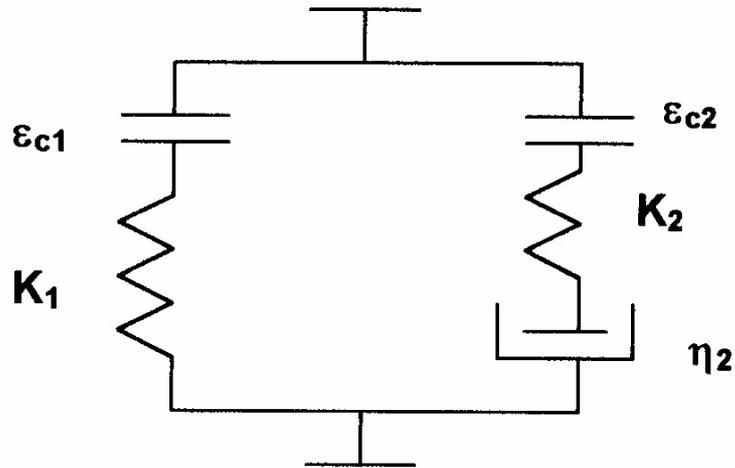


Fig.2.44. Esquema de un modelo de tres elementos (Peleg, 1983)

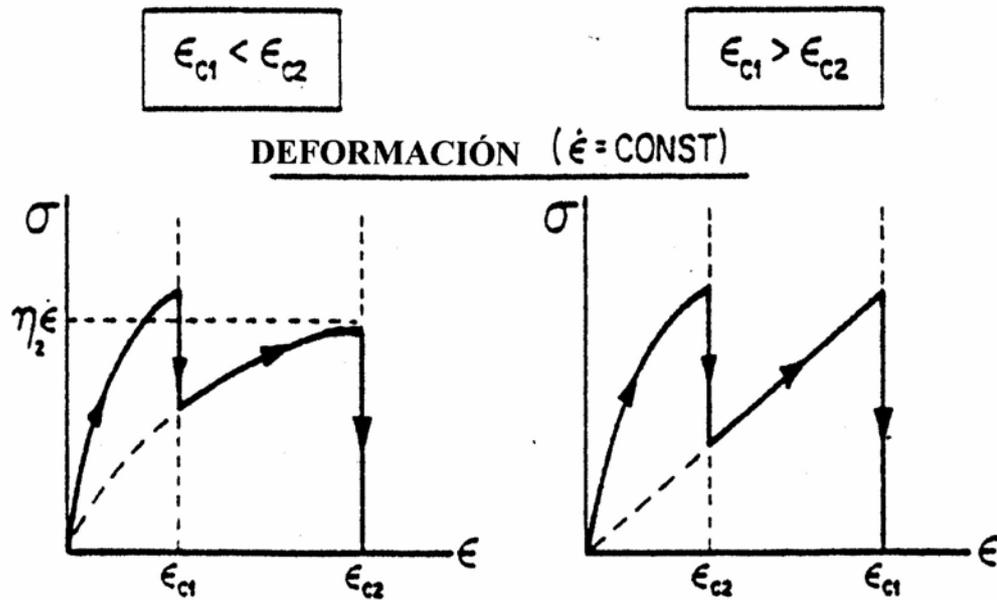


Fig.2.45. Esquema de las posibles respuestas de un modelo de tres elementos con dos criterios de ruptura (ϵ_{c1} y ϵ_{c2}) en la deformación a velocidad de deformación constante (Peleg, 1983)

De esta figura queda claro que si $\epsilon_{c1} > \epsilon_{c2}$ o viceversa, tiene un efecto marcado en el comportamiento del modelo especialmente en pruebas de relajación y capacitancia.

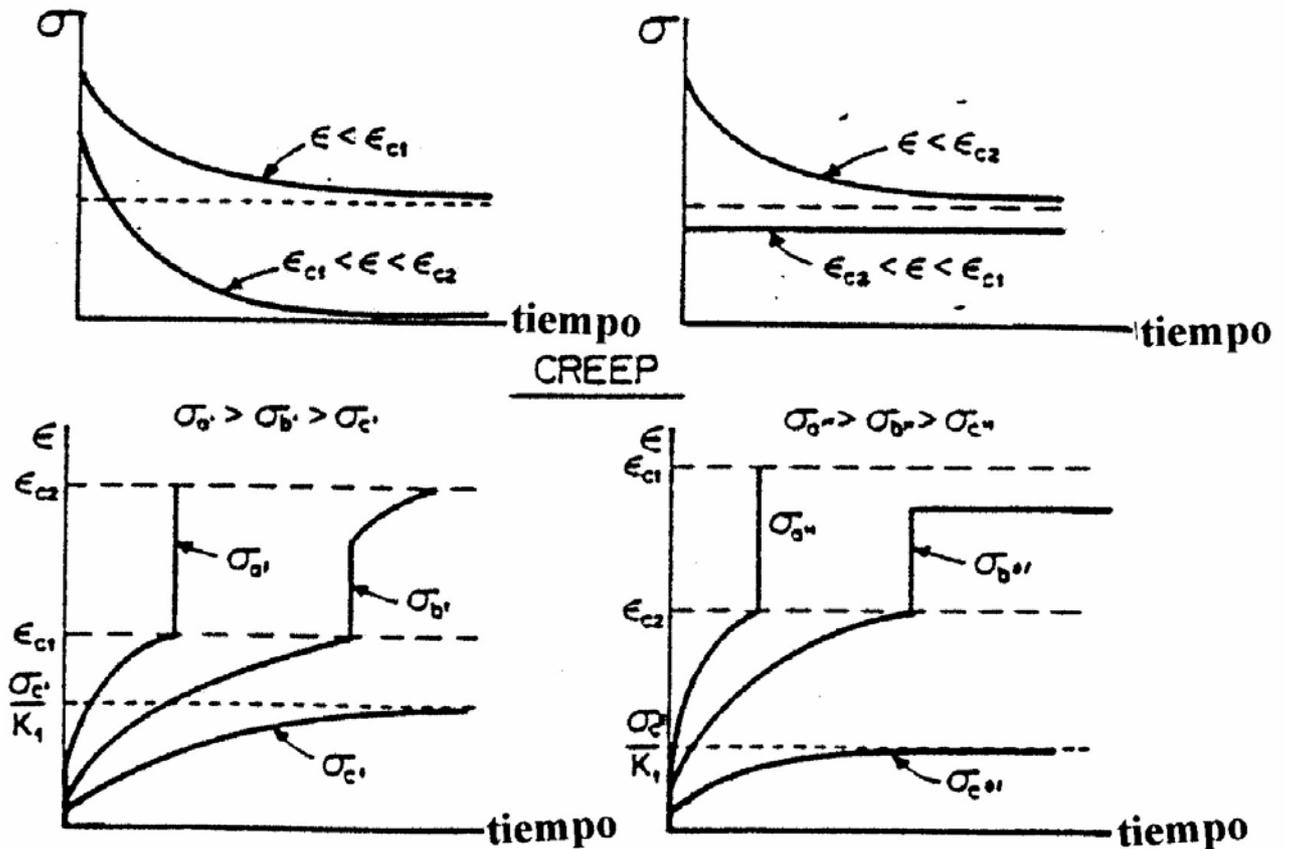


Fig.2.46. Esquema de las posibles respuestas de un modelo de tres elementos con dos criterios de ruptura (ϵ_{c1} y ϵ_{c2}) en prueba de relajación y capacitancia (Peleg, 1983)

Modelos continuos

La diferencia entre modelos discontinuos y generalizados es que estos últimos presentan un espectro continuo de tiempo de relajación. Ambos modelos pueden ser modificados por los elementos de ruptura analizados incluidos en dos formas: uno es que el elemento de rotura por esfuerzo o por deformación se fija a un nivel o a varios niveles discretos y la otra forma es que también sea una función continua.

Con esta situación, el número de posibilidades para simular comportamiento reológico con tales modelos llega a ser infinito y fuertemente dependiente de las funciones de distribución del esfuerzo de ruptura capaces de producir las respuestas reológicas conocidas, especialmente si se incluyen los elementos de contacto. Peleg (1983) plantea que la respuesta simulada de tales modelos sería de la forma mostrada en la figura (2.47).

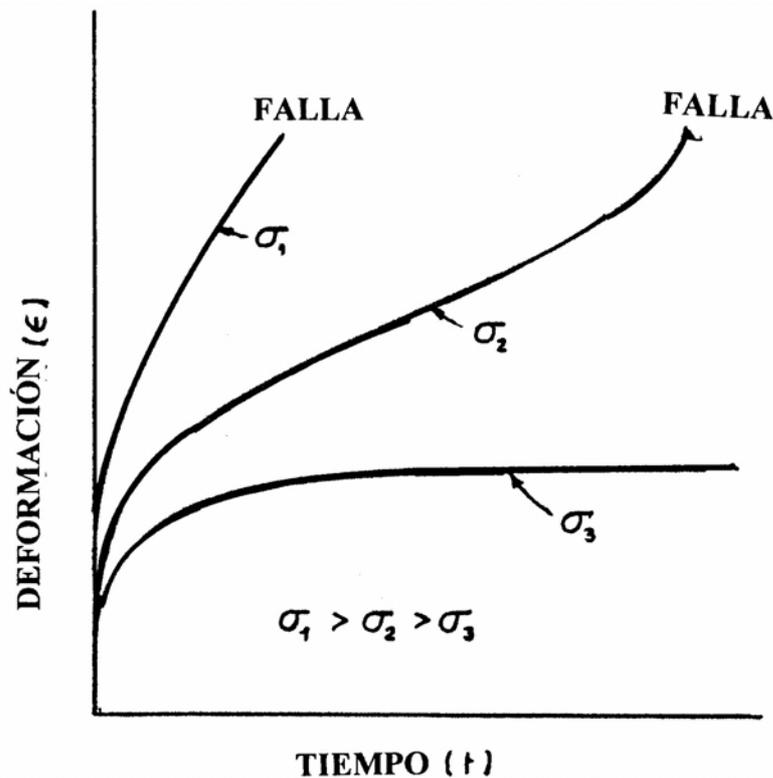


Fig.2.47. Esquema de las curvas típicas de creep obtenidas de materiales sólidos a diferentes tensiones (Peleg, 1983)

Peleg (1983) concluye indicando que la inclusión de ambos criterios de ruptura (esfuerzo y deformación) en los modelos fenomenológicos ofrece tipos de respuestas que no pueden ser elaboradas por la aplicación del criterio de esfuerzo crítico solamente. Para el caso de las pruebas de capacitancia, el concepto de criterio alternativo abre un camino para modelos adicionales que serían más consistentes con el comportamiento real del alimento. Aunque Peleg (1976, 1979a) plantea el criterio de la deformación crítica, cualquier debilitamiento estructural en pruebas de capacitancia puede ser únicamente descrito en términos complicados de elementos de ruptura que obligan a la carga aplicada a distribuirse en un número decreciente de elementos intactos;

este planteamiento conduce a un análisis matemático complejo y difícil y es un problema que se opone a la simplificación de la modelación matemática por lo que puede resultar poco práctico.

Análisis matemático del efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de los materiales viscoelásticos

Se considera un modelo de Maxwell generalizado.

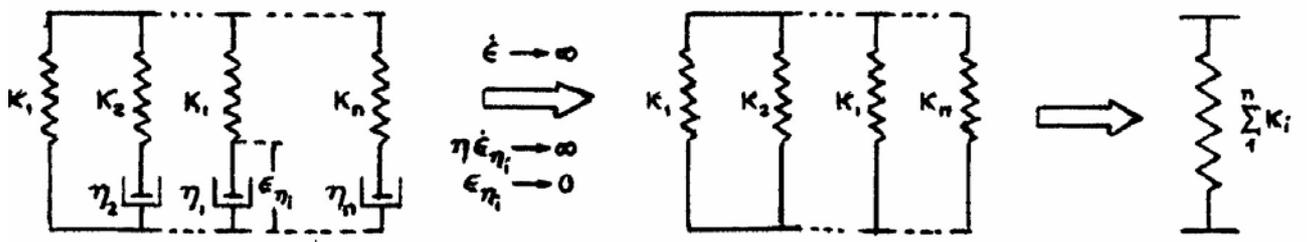


Fig.2.48. Esquema del modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Normand, 1982)

Este modelo es sometido a deformación a una velocidad alta de deformación ($\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$) y en este caso los componentes viscosos están representados por:

$$\sigma_i = \eta_i \dot{\epsilon}_i \tag{61}$$

Donde:

σ_i : esfuerzo del elemento i

η_i : viscosidad del elemento i

$\dot{\epsilon}_i$: Velocidad de deformación del elemento i

Estos elementos se comportan como un sólido indeformable (o sea, una barra sólida). En este caso el modelo se transforma en un componente elástico y puede ser representado por un resorte único, la respuesta del modelo se aproxima al de un cuerpo elástico que puede ser caracterizado por una constante única.

El efecto de la velocidad de deformación en la respuesta de un elemento de Maxwell es:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{K} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{o} \quad K = \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\varepsilon}} + \frac{K \sigma}{\eta \dot{\varepsilon}}$$

$$\text{o} \quad K = \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\varepsilon}} + \frac{\sigma}{\lambda \dot{\varepsilon}} \quad (62)$$

Donde:

σ_i : esfuerzo

$\dot{\sigma}$: velocidad a la que se aplica la tensión

ε : deformación

$\dot{\varepsilon}$: velocidad de deformación

K: constante elástica

η : viscosidad

$\lambda : \eta/K$: tiempo de relajación

A velocidades altas de deformación cuando $\varepsilon \rightarrow \infty$ las relaciones quedan en:

$$K = \dot{\sigma} / \dot{\varepsilon} \quad \text{o} \quad \sigma = K \varepsilon \quad (63)$$

o sea, es un cuerpo de comportamiento elástico. Esto se representa en la figura 2.48.

Lo planteado es válido para cualquier velocidad de deformación finita sólo si la magnitud del término $K\sigma/\eta\dot{\varepsilon}$ o $\sigma/\lambda\dot{\varepsilon}$ es despreciable frente al de $\dot{\sigma}/\dot{\varepsilon}$.

Además se puede apreciar que el nivel de velocidad de deformación en el cual el elemento de Maxwell presente este comportamiento elástico depende del tiempo de relajación (Peleg y Normand, 1982). Según estos autores, este análisis es válido para cualquier modelo caracterizado por un arreglo de Maxwell con la excepción que las características elásticas de deformación serán determinadas por el tiempo de relajación más pequeño de todos los espectros de tiempo de relajación que se presentan. Efectos similares de comportamiento serían observados en otros tipos de modelos lineales aunque determinados por razones de constantes diferentes. De acuerdo con esto, se podría analizar el elemento que tiene el tiempo de relajación más corto aunque el modelo sea no lineal, con la limitante de las constantes y número relativo de elementos con los tiempos de relajación que también dependen de la deformación y de la velocidad de deformación llegando a ser nuevas variables.

Por otra parte, los modelos reales de materiales sólidos deben incluir elementos elásticos y/o un número de elementos adecuados con tiempo de relajación relativamente largo, ya que estos elementos contribuyen al desarrollo total del esfuerzo, dependen menos de la velocidad, ellos tienden a minimizar o modificar el efecto potencial de los elementos con tiempos de relajación más cortos aunque el número de elementos permanezca constante.

Relación esfuerzo-deformación de un elemento de Maxwell

La relación esfuerzo-deformación de un elemento de Maxwell deformado a velocidad de deformación constante ($\dot{\varepsilon} = cte$) que es distinto al caso de las máquinas de ensayo de materiales en que la velocidad del cabezal (V) es constante.

$$A \quad \dot{\varepsilon} = cte$$

$$\sigma_M(\varepsilon) = \eta \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\lambda \dot{\varepsilon}}\right) \right] \quad (64)$$

Donde $\dot{\varepsilon} = \frac{V}{H_0 - Vt}$ y H_0 es la longitud de la muestra

Peleg (1977) plantea que el esfuerzo cumple con la expresión:

$$\sigma(t) = K \exp[a(b-t)] \left\{ \log_e \frac{b}{b-t} + \sum \frac{(-a)^n [b^n - (b-t)^n]}{n \cdot n!} \right\} \quad (65)$$

Donde:

a: recíproco del tiempo de relajación λ ($\lambda=1/a$)

b: recíproco de la velocidad inicial de deformación ($b=H_0/V$)

Peleg y Normand (1982) consideran que la masticación es periódica y la función que la representa es $\varepsilon = A \sin^2 \omega \cdot t$

Donde:

A: amplitud

ω : frecuencia angular

(la función tiene que ser cuadrada para no tener deformación negativa)

La velocidad de deformación instantánea es $\dot{\varepsilon} = 2A \omega \sin \omega \cdot t$

La respuesta del elemento de Maxwell es:

$$e\sigma(t) = \frac{KA\omega \cdot \lambda^2}{1 + 4\omega^2 \lambda^2} \left\{ \frac{1}{\lambda} \sin^2 \omega \cdot \lambda + 4\omega \sin^2 \omega \lambda - 4\omega \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \right) \right\} \quad (66)$$

Peleg y Normand (1982) simularon esta situación, variando los tiempos de relajación entre 0,5 y 30 s; $K = 1$ y $\sigma_c = 0,4$ en forma arbitraria y concluyen que la información obtenida sensorialmente y mecánicamente pueden ser diferente en ambos sistemas debido principalmente a las características reológicas del elemento, el tiempo de relajación y en menor proporción al tiempo exacto de deformación.

ENSAYOS DE RELAJACIÓN Y CAPACITANCIA.

Purkayastha y Peleg (1986) presentaron evidencias de que hay una coincidencia entre los resultados del equilibrio de ensayos de relajación y capacitancia, y estos son originados por las características reológicas de los materiales utilizados. Estos presentaron un esquema de los experimentos de deformación y relajación (figura 2.49).

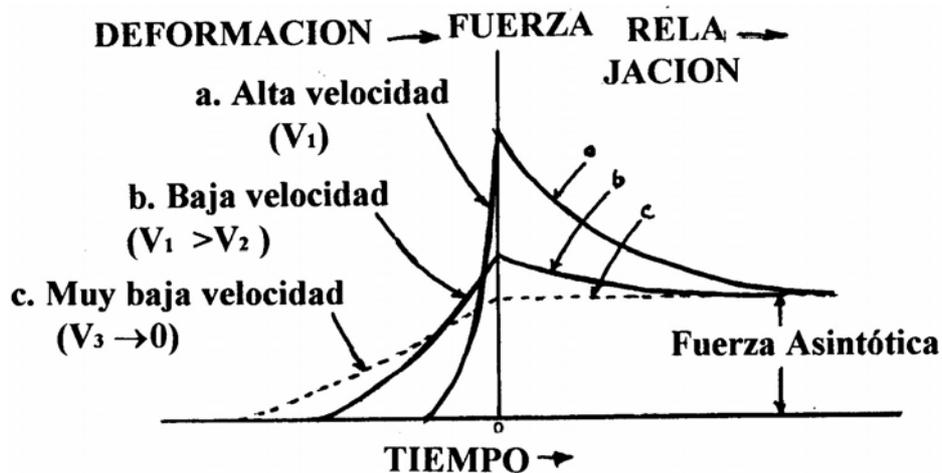


Fig.2.49. Representación esquemática de experimentos de deformación y relajación (V es la velocidad de deformación). Nótese que un sólido viscoelástico se deforma a velocidad muy baja y casi no se relaja (Purkayastha y Peleg, 1986)

Al aplicar la deformación de Hencky se tiene el módulo asintótico de relajación E_a :

$$E_a = \frac{\sigma_0}{\varepsilon} \left(1 - \frac{1}{k_2} \right) \quad (67)$$

Donde:

σ_0 : esfuerzo inicial corregido por el cambio de área

k_2 : constante calculada de
$$\frac{F_0 - F(t)}{F_0} = \frac{t}{k_1 + k_2 t}$$

Purkayastha y Peleg (1986) probaron trozos de papas, queso cheddar y gel de agar y demostraron que el módulo asintótico disminuía con la deformación y al producirse una desintegración como en el caso del queso Cheddar la curva de E_a versus deformación es más vertical. También encontraron en las muestras del gel de agar que se cumple que la razón del esfuerzo asintótico y el esfuerzo inicial (los módulos), tienen una fuerte dependencia de la deformación.

De esta forma estos autores calcularon la capacitancia corregida $J(t)$ como la deformación dividida por el esfuerzo corregido teniendo en cuenta la expansión del área de la muestra sin olvidar que en las pruebas de capacitancia en compresión el esfuerzo disminuye en forma continua (figura 2.50).

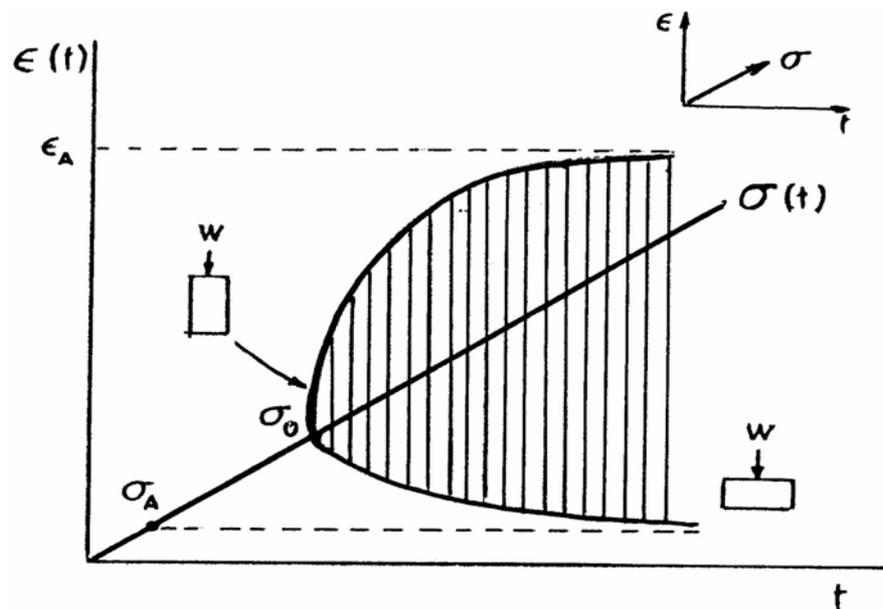


Fig.2.50. Esquema de la progresión de un ensayo de capacitancia y la forma en que la deformación asintótica y capacitancia asintótica fueron calculados por Purkayastha y Peleg(1986)

Para calcular la capacitancia asintótica, se ajustó el siguiente modelo (Purkayastha y col., 1985), utilizando técnicas de regresión no lineal.

$$J(t) = k_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t} + \frac{t}{k_3 + k_4 t} \quad (68)$$

Donde las k_0, k_1, k_2, k_3 y k_4 son constantes.

Cuando $t \rightarrow \infty$

$$\frac{t}{k_1 + k_2 t} \rightarrow \frac{1}{k_2} \text{ y } \frac{t}{k_3 + k_4 t} \rightarrow \frac{1}{k_4}$$

y la capacitancia asintótica (J_A) se calculó como:

$$J_A = k_0 + \frac{t}{k_2} + \frac{t}{k_4} \quad (69)$$

El modelo asintótico, por definición, es el recíproco de la capacitancia en función de la deformación de Hencky.

Al obtener estas curvas Purkayastha y Peleg (1986) encontraron que los módulos asintóticos calculados en las pruebas de capacitancia tienen la misma magnitud de los calculados en los ensayos de relajación. Plantean que a deformaciones grandes, los datos de capacitancia no pueden ser utilizados para predecir el comportamiento en relajación y tampoco los de relajación para predecir el comportamiento durante las pruebas de capacitancia. En sus ensayos con queso Cheddar y gel de agar, el módulo disminuye progresivamente con la deformación en los ensayos de capacitancia, esta situación no se presenta para el caso de la papa donde se presenta un módulo asintótico constante.

Castro (1995) en su extenso trabajo sobre las propiedades reológicas de emulsiones cárnicas para producir vienas, llevó a cabo diversas pruebas de compresión y relajación de muestras de pastas para vienas y vienas con tres formulaciones diferentes (A, B y C) y tipos de carne (vacuno, equino y pavo). En la figura 2.51 se presentan las curvas linealizadas de Peleg donde el valor de "a" se encontró en el intervalo de 0,899 a 0,988, por lo que se consideran como sólidos viscoelásticos. Para la formulación C, las curvas para

las tres especies se superponen mientras que en las formulaciones A y B, se encuentra un mayor nivel de esfuerzo que decae durante la relajación según el siguiente orden:

pasta de equino > pasta de pavo > pasta de vacuno

No encontró diferencias significativas entre especies y formulaciones para el parámetro “a” en este tipo de ensayo sin embargo, el parámetro “b” de la especie equino fue significativamente superior al resto cuando se utiliza la formulación C.

Para los casos de las vienas los valores de “a” se encontraron en el intervalo de 0,463 a 0,556 y se encontraron diferencias significativas de este parámetro entre especies pero no en relación a las formulaciones. Sin embargo, para el parámetro “b” si obtuvo el efecto contrario.

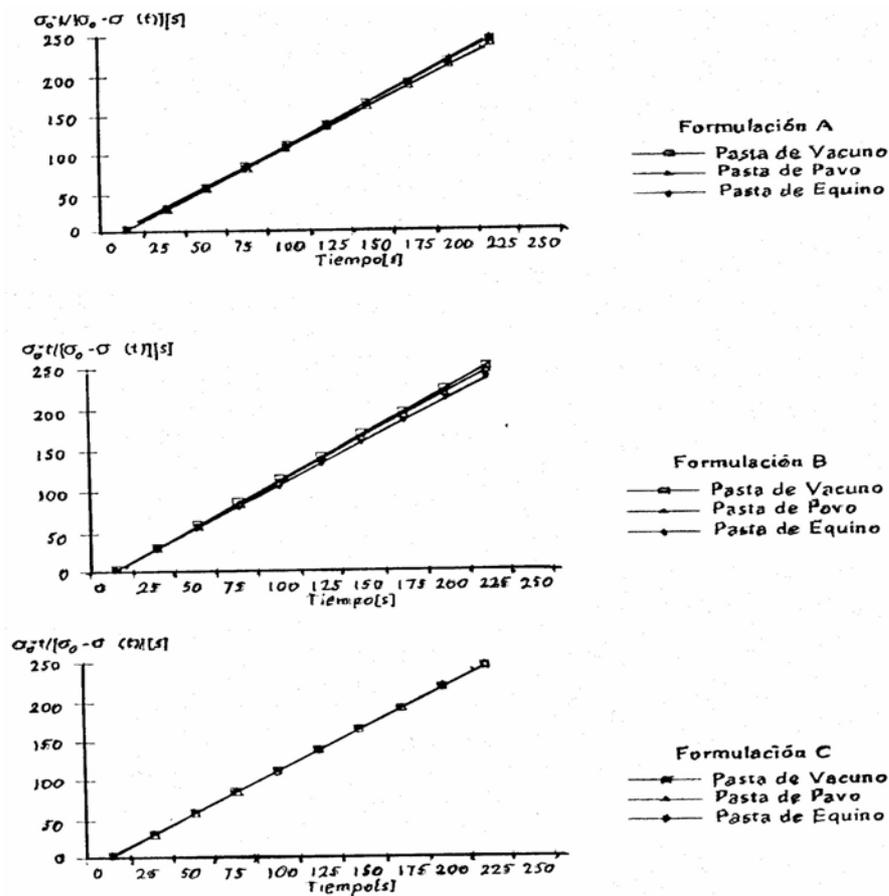


Fig.2.51. Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienas a 28°C, altura inicial 9 mm(Castro,1995)

Los quesos (Port Salut, Tybo y Reggianito) marcas argentinas fueron sometidos a ensayos de relajación donde las curvas fueron expresadas en forma adimensional como $F^* = F(t)/F_0$, donde $F(t)$ es la fuerza al tiempo t y F_0 es la fuerza al inicio de la relajación. Las curvas se ajustaron al modelo de Maxwell Generalizado, compuesto por un elemento elástico puro y dos elementos maxwellianos en paralelo.

$$F^*(t) = A_{00} + A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (70)$$

Donde A_{00}, A_1 y A_2 son constantes que depende de las propiedades viscoelásticas del material y τ_1 y τ_2 son los tiempos de relajación.

Para el queso Port Salut y Tybo el modelo elástico del elemento elástico puro y la viscosidad del elemento con mayor tiempo de relajación disminuyeron a lo largo del almacenamiento. En el caso del queso Reggianito los parámetros obtenidos en los ensayos de relajación no presentaron diferencias significativas hasta los 255 días de maduración (Bertola y col., 1998).

Alimentos esponjosos

En materiales esponjosos Ashby (citado por Peleg y col., 1989), estudió los efectos de la longitud de la pared celular, espesor y esfuerzo en la deformabilidad y ruptura de la esponja y relacionó parámetros mecánicos con la densidad relativa de la espuma (en este caso la densidad relativa es la razón entre la densidad de la espuma y la densidad absoluta de su matriz sólida).

La relación entre fuerza de compresión y deformación tiene la forma típica que se muestra en la figura 2.52.

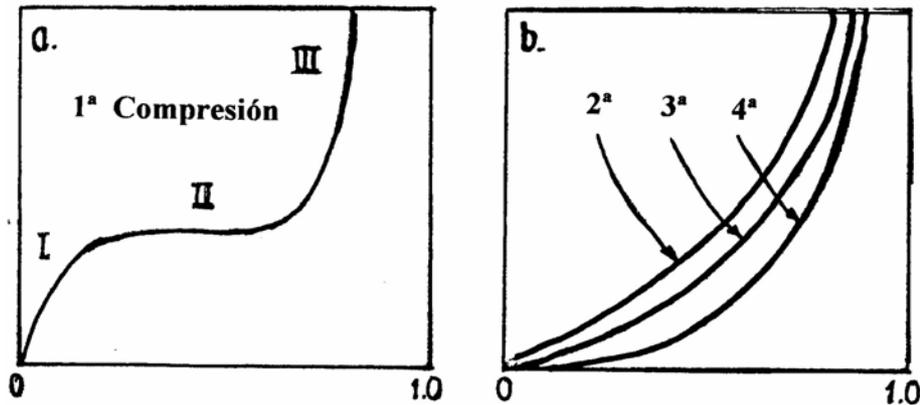


Fig.2.52. Esquema de la forma típica de la curva esfuerzo de compresión vs deformación para alimentos esponjosos (Peleg y col., 1989)

En la figura 2.52 (a):

a) Curva para la primera compresión

La zona I representa la deformación de la matriz original. Esta zona es de naturaleza elástica o casi elástica, debido a la flexión de las paredes celulares. La zona II indica el colapso de las paredes celulares, fluencia o ruptura. La zona III representa la compactación al aplastarse las paredes celulares.

Y en la figura 2.52 (b):

b) Curva típica para varias compresiones.

Al someter el material a varias compresiones cíclicas. Las células de aire son las que contribuyen a la resistencia original de la espuma. Con la ruptura de las paredes celulares, durante el colapso de la primera compresión se debilita o elimina esta fuente de resistencia para los otros ciclos de compresión.

Una esponja de baja densidad tiene todas sus celdas abiertas presentando una resistencia baja hasta que una parte considerable del material de sus paredes celulares empieza a actuar. Esto se manifiesta en los bajos valores de esfuerzo y de la desaparición del hombro, lo que indica que la rotura de las paredes celulares es reversible.

Modelación

La forma de las curvas esfuerzo σ vs deformación puede ser descrita por

$$\sigma = \frac{C_1 \varepsilon}{(1 + C_2 \varepsilon)(C_3 - \varepsilon)} \quad (71)$$

donde:

C_1 : constante que es un factor de escala, determina la magnitud absoluta del esfuerzo y sus unidades.

C_2 : constante que es un índice de la forma que presenta el cambio de pendiente.

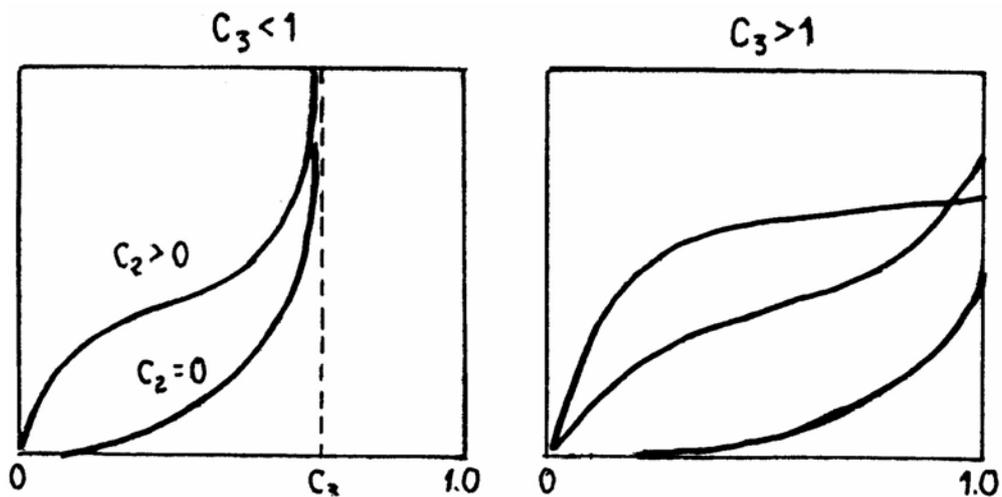


Fig.2.53. Esquema que muestra los efectos de la magnitud C_1 , C_2 y C_3 en las curvas esfuerzo-deformación (Peleg y col., 1989)

En la figura 2.53, la forma exacta del cambio en la pendiente está determinada por C_2 y C_3 . Al ser $C_2 = 0$, la ecuación anterior queda:

$$\sigma = \frac{C_1 \varepsilon}{C_3 - \varepsilon} \quad (72)$$

Que es una relación monótonicamente ascendente sin cambio en la pendiente, tal como se ve en la fig. 2.53.

Al ser $C_2 \gg 1$, la ecuación anterior es:

$$\sigma = \frac{C_1}{C_2(C_3 - \varepsilon)} \quad (73)$$

Si también sucede $C_3 \gg 1 > \varepsilon$, el esfuerzo presenta un plato importante al nivel de: $C_1/C_2 \cdot C_3$. El valor de C_3 establece la relación de la asíntota al suceder que $\varepsilon \rightarrow C_3, \sigma \rightarrow \infty$.

C_3 representa el nivel de deformación en que la compactación del material de la pared celular llega a ser el factor predominante en el mecanismo de la deformación. Sucede que en el caso de un material hecho de células pequeñas y con gruesas paredes celulares, el valor de C_3 es muy pequeño. Se espera que tenga mayor valor (por ejemplo cerca de 1) en un material de estructura abierta y paredes delgadas. No hay que olvidar que desde el punto de vista matemático C_3 puede exceder el valor 1 tal como se presenta en la figura 2.53, pero esto no tiene significado físico.

En el caso del marshmallow, que presenta una estructura que es caracterizada por celdas cerradas, cuyas paredes no colapsan en forma rápida por aplastamiento (buckling). Esta estructura es la que permite la expansión lateral de un marshmallow comprimido que se aleja más al comportamiento de un sólido.

Las relaciones de la curva compresión fuerza $v/$ s deformación de los marshmallow puede ser escrita por un modelo típico de la potencia (Roy y Peleg, 1989):

$$F = K(\Delta H)^n \quad (74)$$

Donde:

F : fuerza

ΔH : deformación

K y n : constantes

Swyngedau y col. (1991) hacen el análisis siguiente del modelo para curvas fuerza-deformación cóncavas.

$$F = K(\Delta H)^n \quad \text{o} \quad \Delta H = (F/K)^{1/n} \quad (75)$$

Donde K representa la dureza y n indica la desviación de la linealidad y el tipo de concavidad.

Cuando el alimento tiene dos capas y hay que predecir un comportamiento con el arreglo de las dos capas a partir del comportamiento de las capas componentes, esto presenta una desventaja que se puede subsanar considerando lo siguiente:

$$\text{Esto se representa por: } \Delta H_F = \Delta H_T(T) \quad (76)$$

$$\Delta H_T = \Delta H_1 + \Delta H_2 = (F/K_1)^{1/n_1} + (F/K_2)^{1/n_2} \quad (77)$$

donde:

ΔH_T : deformación total del arreglo analizado

ΔH_1 : deformación de la capa 1

ΔH_2 : deformación de la capa 2

Los K y n son las constantes respectivas.

Esta relación no puede ser transformada en una forma algebraica explícita de la forma $F = F(\Delta H)$, ya que se requiere de procedimientos numéricos largos y tediosos.

Este problema puede ser resuelto si las curvas fuerza-deformación de cada componente se expresa en términos de los modelos con los parámetros siguientes.

i) Para la curva cóncava hacia arriba $F = \frac{a\Delta H}{c - \Delta H}$ con

$$0 \leq \Delta H \leq c \leq H_0$$

ii) Para la curva cóncava hacia abajo $F = \frac{a\Delta H}{c + \Delta H}$ donde: H_0 es el

espesor de la capa.

La constante “ a ” tiene dimensión de fuerza mientras que “ c ” es de longitud.

Estas relaciones pueden expresarse como $\Delta H = f(F)$ en la forma siguiente:

$$\Delta H = \frac{cF}{a + F} \quad \text{y} \quad \Delta H = \frac{cF}{a - F} \quad (78)$$

La deformación de un cuerpo con dos capas puede expresarse en la forma siguiente:

$$\Delta H_T = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{c_1 F}{a_1 \pm F} + \frac{c_2 F}{a_2 \pm F} \quad (79)$$

Los signos de los términos del lado derecho de la ecuación están determinados por la concavidad hacia arriba o hacia debajo de la curva fuerza-deformación de la capa analizada.

La última relación puede ser transformada en una relación explícita algebraica entre F y ΔH_T , tal como:

$$F = \frac{a_1 c_2 + a_2 c_1 \pm (a_1 + a_2) \Delta H + \sqrt{[a_1 c_2 + a_2 c_1 \pm (a_1 \pm a_2) \Delta H]^2 - 4 a_1 a_2 (c_1 \pm c_2 \pm \Delta H) \Delta H}}{2 a_1 a_2 \Delta H} \quad (80)$$

Las ecuaciones previas pueden transformarse en las formas lineales siguientes:

- i) Para la curva cóncava hacia arriba $\frac{F}{\Delta H} = \frac{a}{c} + \frac{F}{c}$
- ii) Para la curva cóncava hacia abajo $\frac{F}{\Delta H} = \frac{a}{c} - \frac{F}{c}$

Swyngedau y col. (1991), aplicaron este procedimiento a queso americano, queso suizo, vienasas y marshmallow, concluyendo que este procedimiento facilita el análisis de las curvas de compresión de materiales que tienen dos capas, frente al modelo de la Ley de la Potencia y que representaría el comportamiento de los dedos al hacer un ensayo sensorial.

No debe olvidarse que la estructura del marshmallow está caracterizada por una multitud de celdas cerradas, que no pueden colapsarse rápidamente por compresión, ya que el material puede demorarse en recuperar sus medidas originales.

Determinación del Grado de Elasticidad.

Kaletung y col. (1992) plantean una revisión del concepto de elasticidad; que es la propiedad de un objeto de recuperar su forma y tamaño original después de sufrir una deformación. Consecuentemente, la elasticidad de un material no puede ser inferida solamente a partir de las relaciones fuerza-deformación o esfuerzo-deformación.

Anteriormente, Mohsenin (1986) ha definido el concepto de “grado de elasticidad” como la relación entre la deformación recuperable y la deformación total y que puede medirse en un ciclo de compresión-decompresión. Debido a que la identificación precisa de la deformación recuperable a partir de la gráfica en tal tipo de prueba es extremadamente difícil, un método más confiable es medir el trabajo recuperable y total, lo cual no solamente puede medirse en un solo ciclo sino en varios ciclos consecutivos.

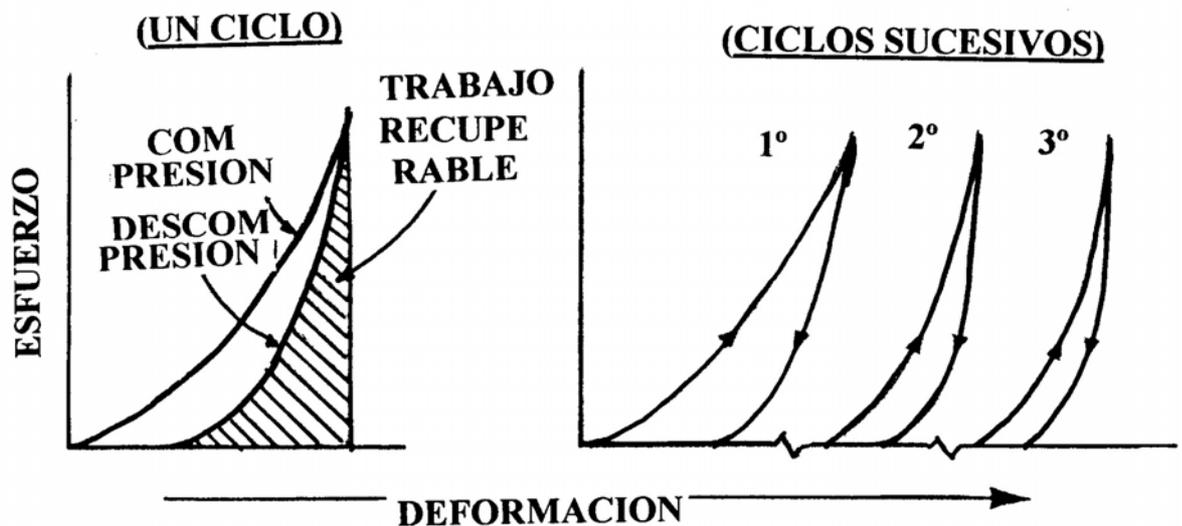


Fig.2.54. Esquema de la relación esfuerzo-deformación de marshmallows en ciclos de compresión sucesivos (Lee y col., 1983)

Kaletung y col. (1991) midieron este parámetro en diferentes productos (papas, bananas, queso Cheddar y otros productos), realizando pruebas de compresión uniaxial de muestras cilíndricas en dos modos diferentes de compresión: 1) compresión hasta fractura y 2) cuatro ciclos sucesivos de compresión-decompresión hasta el 15 o 25% de deformación.

Concluyen señalando que la magnitud del trabajo recuperable, su dependencia con la deformación y la respuesta a ciclos sucesivos son características de cada material. Los valores del trabajo recuperable se encontraron en el intervalo de 60-80% en los materiales considerados como “elásticos” y entre el 20-50% en denominados “plásticos”.

En el caso del estudio realizado por Kaletung y col. (1992) en relación al marshmallow, al realizar el análisis de los datos de porcentaje de trabajo recuperable v/s porcentaje de deformación encontraron que a bajas deformaciones, había diferencias mayores en el porcentaje de trabajo recuperable. La técnica es sensible hasta niveles de deformación del 15-20%. Debido a que el producto es de naturaleza viscoelástica, los resultados se afectan por la velocidad de deformación y por el tiempo de receso entre ciclos. Las expresiones matemáticas utilizadas fueron las siguientes:

$$\sigma_{cor}(t) = F(t) \left[\frac{H_0 - \Delta H(t)}{A_0 - \Delta H(t)} \right] \quad \text{y} \quad (81)$$

$$\varepsilon_H(t) = Ln \left[\frac{H_0}{H_0 - \Delta H(t)} \right] \quad (82)$$

Donde:

$F(t)$: fuerza aplicada en función del tiempo t .

$\Delta H(t)$: deformación absoluta al tiempo t .

A_0 : área original

H_0 : longitud original.

$\sigma_{cor}(t)$: esfuerzo corregido.

$\varepsilon_H(t)$: deformación de Hencky.

Para el caso de geles, Kaletung y col. (1991) prepararon geles de agar, alginato y de k-carragenina en forma cilíndrica y se comprimieron en una máquina Instron mediante una prueba de compresión uniaxial para determinar el esfuerzo de fractura y la deformación en la ruptura y además, las muestras se sometieron a 5 ciclos de compresión-descompresión sucesivas a diferentes niveles de deformación. Haciendo uso de las expresiones anteriores (ecuaciones 81 y 82), calcularon los parámetros; resistencia, deformación en la ruptura y el módulo de deformabilidad, este último como la pendiente de la relación esfuerzo corregido vs. deformación de Hencky. Concluyen el trabajo señalando que la porción del trabajo irrecuperable, que sirve como una medida de la desviación respecto a la elasticidad ideal, no pudo correlacionarse con la resistencia del gel ni con el resto de los parámetros calculados, indicando que el grado de elasticidad es una propiedad independiente de estos geles.

Vida útil

Los ensayos texturales son excelentes para determinar la vida útil, ya que estas propiedades van cambiando en el tiempo de vida del producto. Esta idea se aclarará con los ejemplos siguientes.

Mazapán

El mazapán es un producto a base de almendras molidas, a las que se les adiciona azúcar en distintas proporciones y se amasa para obtener diferentes productos tales como figuras, rollos, rellenos para bombones, etc.

Los ensayos texturales, se realizaron en una máquina para ensayos de materiales Lloyd LR - 5K, utilizando una celda Kramer (prueba compleja, ya que realmente se mide compresión, cizalla y extrusión) a las muestras, al mes 1, mes 2 y mes 5 de almacenamiento.

A las curvas obtenidas se les ajustó un modelo tipo potencia $F = K(\Delta H)^n$ en que F es el esfuerzo real y la deformación ΔH .

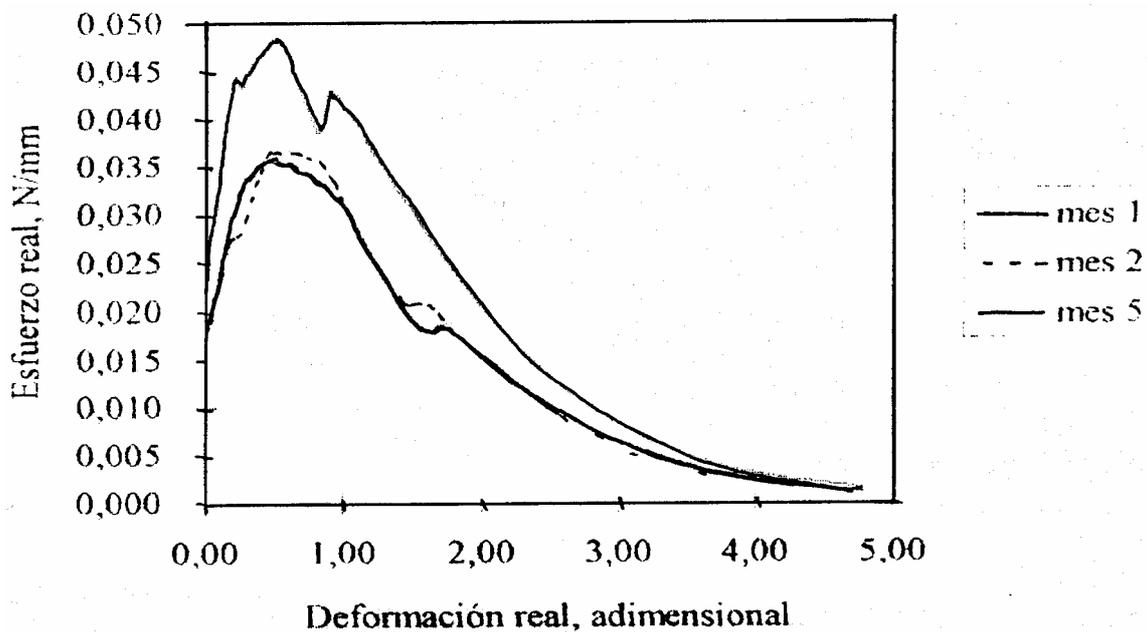


Fig.2.55. Curva de esfuerzo real vs deformación real para la masa rollo a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).

Masa rollo

Es la masa antes de convertirla en las figuras tradicionales de mazapán.

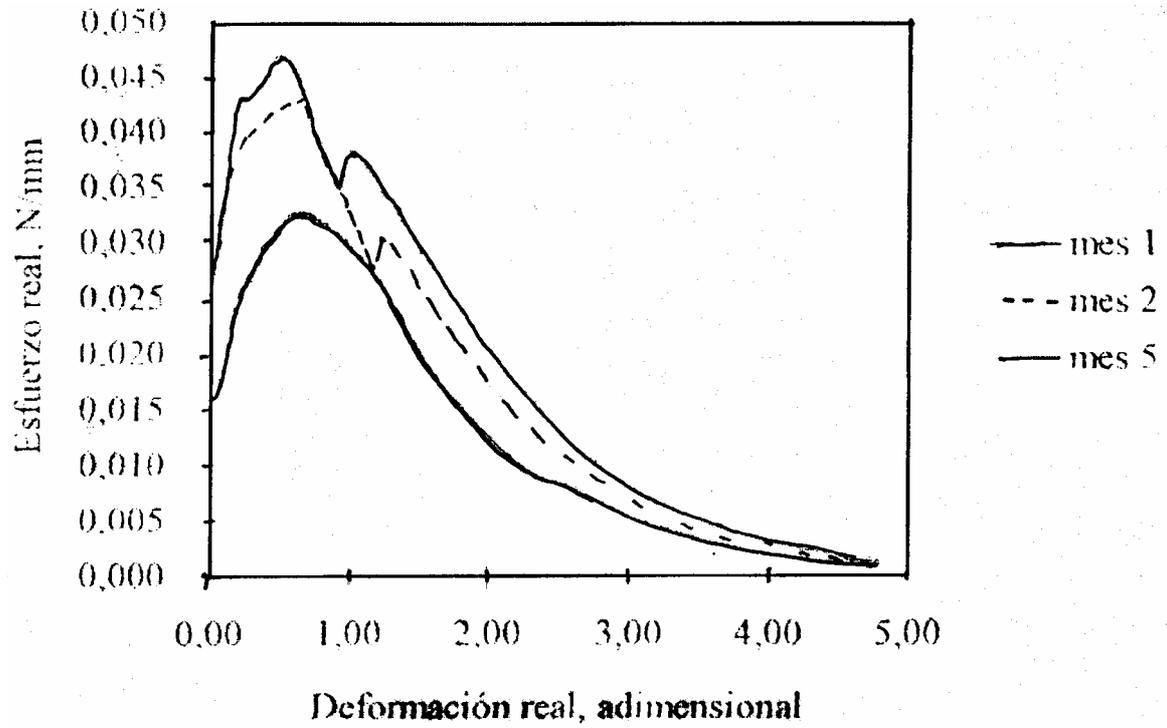


Fig.2.56. Curva de esfuerzo real vs deformación real para la masa de fruta a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997)

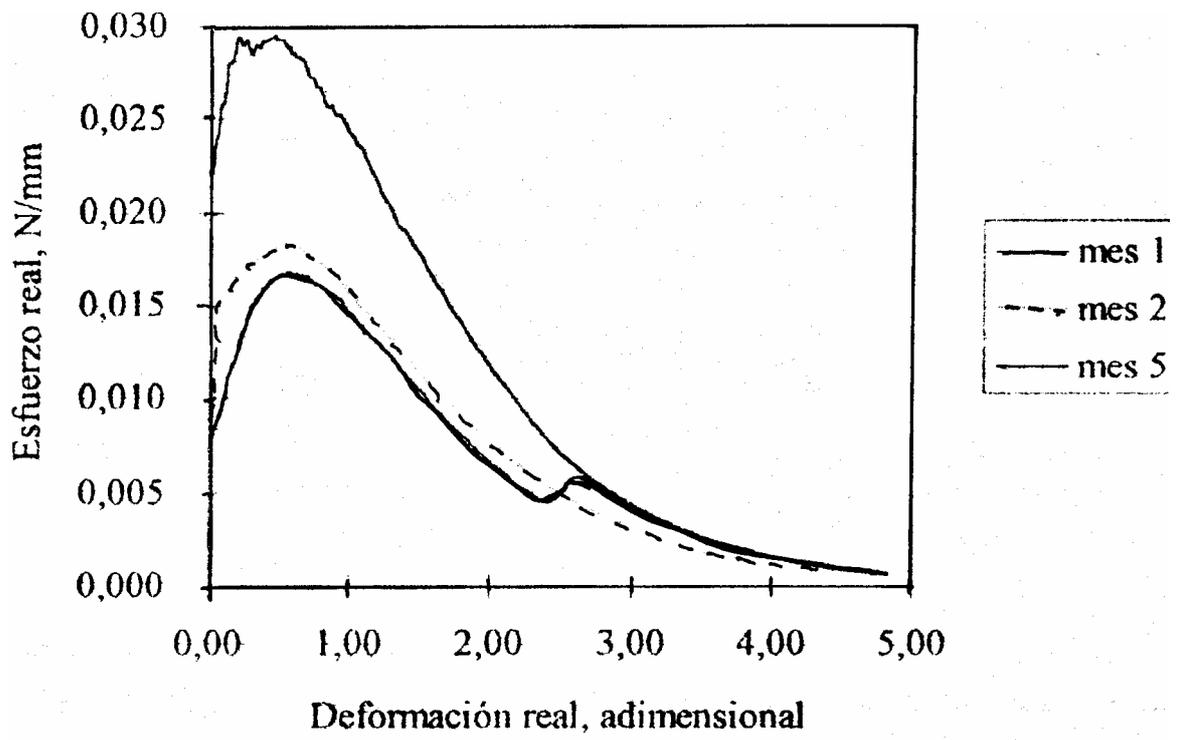


Fig.2.57. Curva de esfuerzo real vs deformación real para la masa orange a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).

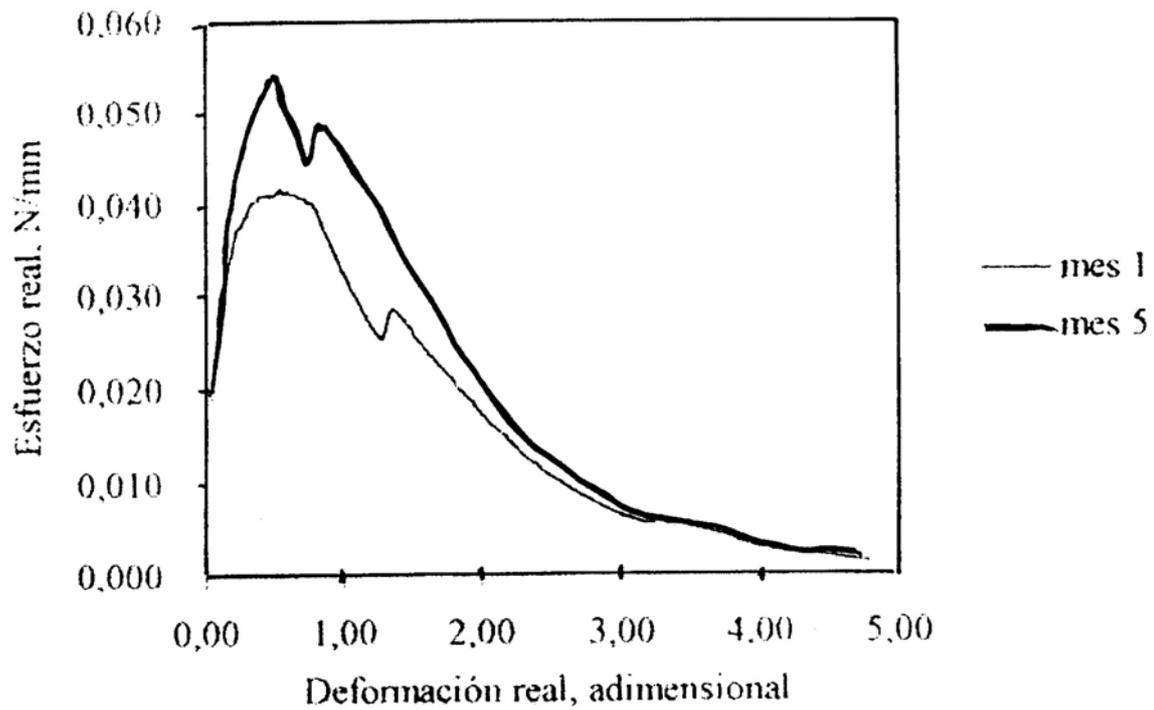


Fig.2.58. Curva de esfuerzo real vs deformación real para las frutas terminadas a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997)

Las figuras demuestran que las curvas tienen concavidad hacia abajo y dan cuenta del cambio de las propiedades texturales en función del tiempo de almacenamiento, ya que demostraron como los productos aumentaron su resistencia al cambiar el tiempo.

**Roger A. de Hombre
Morgado**

CAPITULO III. MEDIDORES INSTRUMENTALES DE TEXTURA DE SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS

La textura puede considerarse como una manifestación de las propiedades reológicas de un alimento. Es un atributo importante de calidad que influye en los hábitos alimentarios, la salud oral y la preferencia del consumidor; en el procesamiento y manipulación de alimentos, puede tomarse como índice de deterioro. La importancia de la textura en la calidad total varía ampliamente en función del tipo de alimento, entre otros factores; así, por ejemplo, aquellos casos donde la textura puede ser un factor crítico en la calidad de alimentos tales como papas fritas, hojuelas de maíz, galletas y otros productos crujientes. Es por todo esto que existe mucho interés por tratar de medir la textura a través de métodos cuantitativos.

Diferentes encuestas realizadas en la industria con la finalidad de tener elementos acerca del equipamiento y las técnicas reológicas utilizadas, han sido publicadas en la década de los 70 (Tabla 3.1).

Pregunta	Inglaterra	Canadá	Cuba
Usan algún instrumento para medir textura	55%	52%	15%
No usan pero desean Utilizarlos	47%	50%	75%
Industrias de mayor uso	Cereales	Conservas	Lácteos y Conservas
Industrias de menor uso	Carne, Frutas y Vegetales	Bebidas	Resto de las Industrias
Instrumentos más utilizados	Farinógrafo, Extensógrafo	Viscosímetro Brookfield, Penetrómetro	Viscosímetro de orificio
Referencias	Müller, H.G., 1969	Cumming y col., 1971	De Hombre, R., 1979

Tabla 3.1. Encuesta sobre métodos reológicos utilizados en la industria.

La conclusión que puede extraerse de estas encuestas está lejos de ser satisfactoria; existen muchos alimentos a los que no se aplican técnicas para medir la textura y, en otros casos, la forma de medición no resulta adecuada. Este panorama de los años 70 se ha transformado lentamente, hasta que a partir de los años 90, con la aparición en el mercado de texturómetros más sencillos, versátiles, baratos y de pequeñas dimensiones, la gran industria en muchas regiones del área iberoamericana ha podido introducir las mediciones instrumentales de la textura, como un aporte más a los ensayos que se utilizan para los sistemas de aseguramiento de la calidad total.

La literatura recoge una gran variedad de instrumentos de medición de la textura, como son las revisiones de: Finney(1969), Gordon (1969), Heiss y Witzel (1969), Kramer y Twigg (1966) y otros. La dificultad principal con estos equipos, en muchos casos, es que se desconoce exactamente qué propiedad se mide y entonces ha surgido una diversidad de parámetros que en ocasiones, han sido pobremente definidos o mal interpretados y han creado confusión; en otros las correlaciones con la medición sensorial han sido no significativas, por lo que no puede asegurarse entonces que dicho instrumento mida la propiedad sensorial que se desea. Los métodos de medición de la textura de los alimentos pueden clasificarse en: fundamentales, empíricos e imitativos. Las pruebas fundamentales miden propiedades reológicas fundamentales, tales como viscosidad y módulo elástico; desde el punto de vista práctico presentan poco interés, ya que solamente pueden ser útiles para definir o caracterizar sistemas, sus relaciones con la estructura y proporcionar las bases para el desarrollo de ensayos empíricos o imitativos. Además, se ha demostrado que en general, ofrecen correlaciones muy pobres con la evaluación sensorial de la textura y las pruebas requieren de un material homogéneo y de forma o tamaño perfectamente conocido, entre otras.

Las pruebas empíricas son las más utilizadas en la industria, principalmente debido a su rapidez y sencillez, además de que ofrecen mejores correlaciones con la evaluación sensorial que las pruebas fundamentales. Sin embargo, los resultados obtenidos son válidos solamente para ese instrumento y no pueden extrapolarse a otro sistema de medida.

Las técnicas imitativas se desarrollan bajo condiciones que simulan las que se utilizan en la práctica y existen instrumentos que pueden medir las

propiedades del material durante la manipulación (como son los que miden la untuosidad de la mantequilla y las características de las harinas: farinógrafo, alveógrafo y amilógrafo) y los que simulan el proceso masticatorio (mandíbula de Volodkevich, Tenderómetro MIT, Texturómetro de la GFC y otros).

En el presente capítulo se tratarán exclusivamente las técnicas e instrumentos empíricos más importantes que pueden ser utilizados para determinar la textura de alimentos sólidos y semisólidos, mostrando a la vez, los modestos aportes y las experiencias desarrolladas en Cuba.

Penetrómetros

Se basan en la medición, en un intervalo de tiempo, de la distancia o fuerza de penetración de un vástago cilíndrico, aguja, cono o bola en el alimento. Un ejemplo típico es el gelómetro Bloom, que es el método estándar para gelatinas. Para el caso de frutas y vegetales frescos, se tiene el Medidor de Presión de Frutas, que utiliza un vástago cilíndrico de 5/16 pulgadas de diámetro para penetrar el alimento y medir la fuerza de penetración a una determinada distancia (Magness y Taylor, 1925). En la actualidad se comercializa un gran número de penetrómetros para frutas que son portátiles, muy fáciles de manejar y de buena precisión (fig. 3.1).

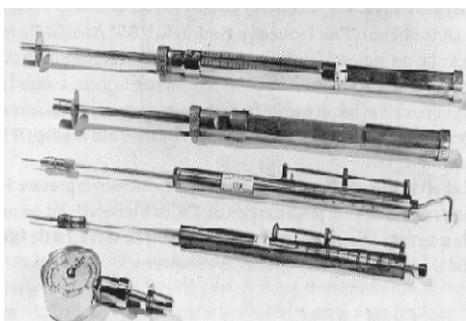


Fig. 3.1.- Algunos Penetrómetros manuales

Otro muy utilizado es el penetrómetro para grasas de la ASTM (fig. 3.2), que mide la profundidad de penetración de un cono en su caída libre sobre la superficie de la muestra (Haighton, 1959).



Fig. 3.2. Penetrómetro para grasas de ASTM.

De acuerdo con Haighton (1959), la siguiente fórmula puede aplicarse para la penetración de un cono en grasa sólida para un amplio intervalo de durezas:

$$C = KW/p^{1.6} \quad (83)$$

Donde: C es el “valor de fluencia”; K es una constante que depende del ángulo del cono; W es el peso del cono en gramos; “ p ” es la profundidad de penetración después de 5 segundos.

El campo de utilización de este instrumento se ha ampliado para diversos alimentos grasos, tales como margarina, mantequilla (Dixson y Parekh, 1979; DeMan y col., 1979) y más recientemente a quesos (Hernández y Díaz, 1989; Díaz y Hernández, 1994) y barras de chocolate (De Hombre, 1997).

La consistencia de la mayonesa y productos similares puede determinarse instrumentalmente con la “plomada” (fig. 3.3), hecha de aluminio de 13 cm de largo y peso aproximado de 15 g, la cual se deja caer en la muestra desde una determinada altura. La profundidad de penetración puede leerse directamente en la propia plomada, ya que la misma está graduada en cm. De Hombre y Rodríguez (1995) han utilizado esta técnica para el control de la consistencia de la mayonesa elaborada en Cuba; realizaron un amplio estudio, donde determinaron el tipo de plomada (peso y talla), altura de caída y tiempo de penetración que posteriormente se correlacionó con la evaluación sensorial (empleando un grupo de jueces adiestrados) y con la viscosidad (medida en un viscosímetro rotacional Haake Rotovisko RV3). Las correlaciones fueron altamente significativas (-0,885 y 0,912 respectivamente)

para una altura de 15 cm de la boca del pomo y 15 s de penetración de la plomada. Actualmente, el método se encuentra implementado en todas las fábricas del país, como control rutinario normalizado (De Hombre, 1997).

Otros instrumentos basados en esta prueba son el Analizador de Textura de Stevens, el cual fue desarrollado por la Asociación de Investigaciones en Alimentos de Leatherhead (LFRA) de Inglaterra para medir la fuerza de gel en gelatina y otros productos y el Medidor de Geles de la Marine Colloids, Inc., que se utiliza en varios tipos de geles y otros alimentos blandos.

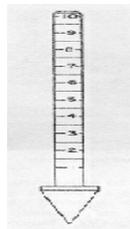


Figura 3.3. Plomada para mayonesa

Aquellos instrumentos que presentan múltiples pines de penetración son el Tenderómetro de Armour, que consiste en un juego de 10 pines y se utiliza para medir la ternura de la carne fresca.

El Texturómetro Christel con 25 vástagos cilíndricos de 3/16 pulgadas de diámetro y el Maturómetro desarrollado en Australia con 143 pines de 1/8 pulgadas de diámetro, son utilizados para medir la textura de guisantes.

Pruebas de penetración con un texturómetro

En estas la penetración en el alimento se lleva hasta una profundidad tal que cause un aplastamiento irreversible o flujo del material; por lo general se mide la “fuerza máxima de penetración” (fig. 3.4) como una medida de la firmeza o consistencia del producto, pero a partir de las curvas de fuerza vs. distancia, pueden calcularse otros parámetros: módulo elástico aparente, deformabilidad, etc.

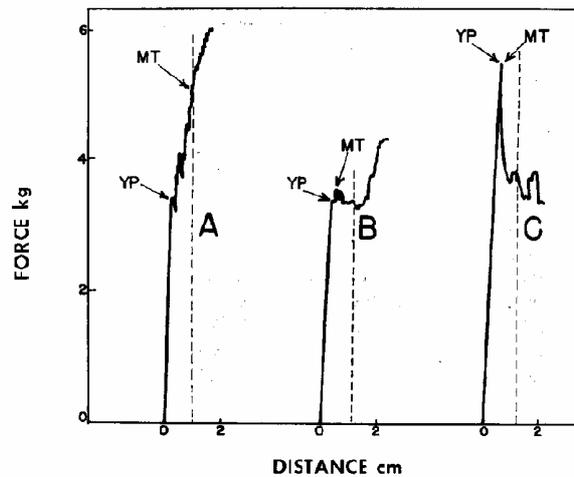


Figura 3.4. Curvas de penetración con texturómetro.

En la figura 3.4, YP indica el momento donde ocurre el primer cambio significativo de la pendiente de la curva. Esta prueba es la más sencilla y útil cuando se trata de frutas y vegetales frescos, pero puede emplearse en cualquier tipo de alimento: geles, quesos, pastas cárnicas, granos, mantequilla y otros productos grasos.

Bourne(1966) mostró que la fuerza máxima de penetración (o fuerza de fluencia) es directamente proporcional tanto al área como al perímetro del vástago utilizado y propuso la ecuación:

$$F = K_C + K_S P + C \quad (84)$$

Donde:

F es la fuerza máxima de penetración (o fuerza de fluencia);

A y P son área y perímetro del vástago, respectivamente;

K_C es el coeficiente de compresión;

K_S es el coeficiente de cizallamiento y

C es una constante (figura 3.5).

Esta ecuación fue confirmada posteriormente por De Man (1969) para queso, sin embargo para mantequilla y margarina, el valor del coeficiente de cizallamiento es cero, por lo que la fuerza máxima de penetración será solo

dependiente del área del vástago. De Man consideró que para grasas existe flujo en lugar de compresión y para estos productos postuló la ecuación:

$$F = K_f A \quad (85)$$

Donde: K_f es coeficiente de flujo.

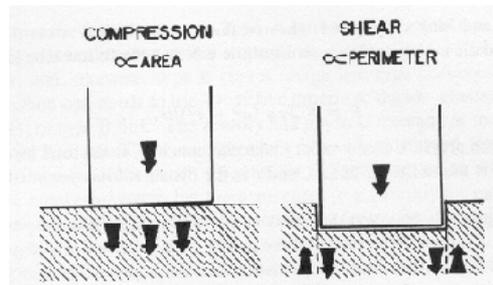


Figura 3.5. Esquema de una prueba de penetración

Recientemente, De Hombre y col. (1998) han utilizado esta prueba en barras de chocolate empleando conos de diferentes ángulos (10-40°) montados en una máquina Instron. Ajustando la ley de potencia a partir de los datos de fuerza vs. distancia, calcularon el valor del “esfuerzo de fluencia” (σ) y encontraron magníficas correlaciones con la medición sensorial de la dureza para el caso del cono de 30° y velocidad de penetración de 10 cm/min. Una curva de penetración típica de un cono acoplado a una máquina Instron para barras de chocolate se muestra en la figura 3.6, donde se aprecia claramente que la curva es exponencial y responde a una de ecuación con exponente mayor que 1.

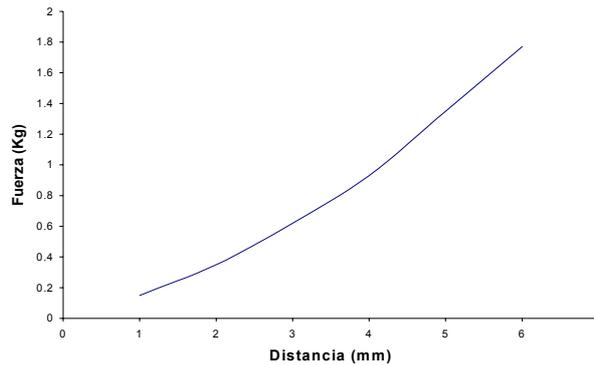


Figura 3.6. Curva típica de penetración de un cono en barras de chocolate

La prueba de penetración de un vástago cilíndrico y de extremo plano de 1,1 cm. de diámetro, es una técnica normalizada en el Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia (IIIA) de Cuba para medir la firmeza de geles de carragenina, agar y otros agentes gelificantes (De Hombre, 1994a). Un amplio estudio de variedades de frutas tropicales tales como guayaba, mango y papaya empleando la técnica de penetración ha sido también realizado en el IIIA (De Hombre y Piñera, 1985; Casals y De Hombre, 1990). Basados en la textura de la materia prima y de los productos elaborados, los autores seleccionaron las mejores variedades para la industria teniendo en cuenta además otras características físico-químicas y sensoriales. La prueba utilizada es capaz de ofrecer resultados que difieren según la variedad de la fruta.

La firmeza del “coágulo” se puede medir, como la fuerza máxima de rotura, empleando una prueba de penetración con un disco (4,72 cm de diámetro) acoplado al Instron, a velocidad de penetración de 5 cm/min, atemperando las muestras a 10 °C antes de las mediciones. Estas evaluaciones texturales tienen valor no solo como control de calidad, sino también para análisis del proceso y sus variables, con vistas a definir, ajustar u optimizar la tecnología; tal es el caso de los resultados experimentales que se presentan a continuación, con los que se estudió la influencia de la temperatura de incubación (fermentación) y de la presión de homogeneización de la leche, en producciones semi-industriales (De Hombre y Díaz, 1984).

<i>T inc. (°C)</i>	<i>P hom. (kg/cm²)</i>	<i>Fi (g)</i>
34	100	172
39	100	160
44	100	175
34	175	201
39	175	205
44	175	216
34	200	220
39	200	233
44	200	247

Tabla 3.2. Firmeza del Yogur (Fi), por penetración con el INSTRON 1140, según la temperatura de incubación (T inc) y la presión de homogeneización (P hom).

Las curvas de penetración obtenidas son características para este tipo de producto y muy parecidas a las obtenidas por Pedersen (1980) y Christensen y Trudsoe (1980), para geles de carrageninas.

Recientemente se han reportado otros estudios amplios sobre la relación de diferentes etapas y condiciones de procesamiento del yogur, con su comportamiento reológico y su estructura, empleando un reómetro oscilatorio (Roennegard y Dejmek, 1994) muy preciso, pero muy sofisticado y caro.

Compresímetros

Estos instrumentos miden la resistencia del alimento a la compresión. Al igual que en la penetración, estos equipos pueden medir tanto la fuerza necesaria para producir una deformación dada, como la deformación causada por una determinada fuerza. El compresímetro de Baker producido por F. Watkins Corp. es probablemente el más conocido y es un método estándar para determinar la firmeza del pan (AACC, Cereal Laboratory Methods, 1962) aunque el método más recomendado en la actualidad es el AACC (Cereal

Laboratory Methods) Method 74-09 de 1988, que utiliza una máquina Instron con determinadas condiciones de operación. La compresión puede ser uniaxial cuando ocurre en una sola dirección y volumétrica, cuando se comprime en tres direcciones. La compresión uniaxial aplicada a un sólido de Hooke, con el área de la sección transversal uniforme para deformaciones pequeñas antes de la ruptura, da origen a la propiedad conocida como Coeficiente o Módulo Elástico(E), que representa la pendiente de la curva esfuerzo vs. deformación que se obtiene en esta prueba. Pero como la mayoría de los alimentos son de naturaleza viscoelástica y por lo general se someten a niveles de compresión más grandes, la definición exacta del módulo elástico rara vez se aplica a alimentos (Aguilera y Durán, 1996).

PRUEBAS DE COMPRESION EN UN TEXTUROMETRO

Una prueba de doble compresión muy utilizada aún en la actualidad, en el análisis de la textura de los alimentos, es el llamado Análisis del Perfil de Textura (TPA). Desarrollado por un grupo de investigadores de la General Foods Corporation en los años 60, mediante el uso de un texturómetro de la misma firma para obtener varios parámetros de textura, ha demostrado la elevada correlación que existe entre las mediciones por esta técnica y la evaluación sensorial (Friedman y col, 1963; Szczesniak, 1963). Bourne (1968) fue el pionero en adaptar una máquina Instron para desarrollar el análisis del perfil de textura. Una curva generalizada se muestra en la figura 3.7 donde se aprecian algunos de los principales parámetros que se evalúan.

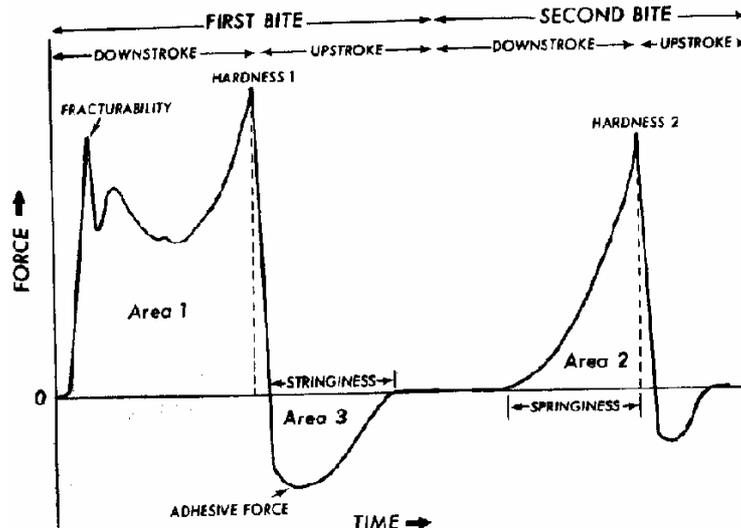


Figura 3.7. Curva generalizada del Análisis del Perfil de Textura

Los parámetros del Análisis del Perfil de Textura que pueden obtenerse son: Dureza, Fracturabilidad, Elasticidad, Cohesividad, Adhesividad, Gomosidad y Masticabilidad. En la literatura pueden encontrarse muchos artículos publicados donde aparecen resultados de estos parámetros para diferentes alimentos y una versión completa de este tema puede encontrarse en la extensa revisión realizada por Breene (1975).

El Análisis del Perfil de Textura es en la actualidad una técnica normalizada en el IIIA para quesos semiduros y embutidos cárnicos de pasta fina (De Hombre, 1994b). En el caso de quesos semiduros, un grupo de investigadores del ISPJAE (Instituto Superior Politecnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba) y del IIIA desarrollaron un extenso trabajo con quesos de diferentes tipos (Gouda, Samsó, Dambo, Fontina, Patagrás), tomando varias producciones y en distintas fábricas del país; al realizar una doble compresión a diferentes velocidades y niveles de compresión, se calculan los parámetros del perfil de textura, según las curvas obtenidas. Se encontraron magníficas correlaciones con las evaluaciones sensoriales de la dureza y la elasticidad, cuando las condiciones de operación del instrumento fueron de 20 cm/min de velocidad de compresión y un 75% de compresión de la muestra cortada en forma de cubo (Cadavieco y De Hombre, 1982; De Hombre y col. 1986; Hernández y Díaz, 1989). La técnica ha sido también empleada para estudiar los cambios durante la maduración de quesos y las relaciones de la textura con la degradación de las proteínas y la composición

de los quesos (Zurita y col, 1982; De Hombre y col, 1986; Hernández y Díaz, 1989).

Más recientemente, Bertola y col (1998), del Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA) en Argentina, utilizaron esta prueba para determinar la dureza y la adhesividad de 4 tipos de quesos madurados en películas plásticas y encontraron correlaciones significativas de la textura con el grado de proteolisis

Esta técnica del Análisis del Perfil de Textura ha ofrecido magníficos resultados, también, en perros calientes, en los que se ha sustituido parcialmente la carne por algún tipo de extensor (De Hombre, 1988). La compresión simple se ha utilizado para medir la resistencia a la compresión de diferentes variedades de tomate (De Hombre, 2001), de cebollas durante la conservación por irradiación (Iglesias y De Hombre, 1994) y en otros productos agrícolas tales como papas y zanahoria (De Hombre, 2000). También es el método estándar recomendado por la AACC para medir la firmeza de la miga del pan, mediante el cálculo de la fuerza de compresión de una rebanada de pan de 25 mm de espesor, cuando el producto se comprime hasta el 25% de su altura total a una velocidad de compresión de 10 cm/min, en una máquina Instron (AACC Method 74-09, 1988).

Pruebas de corte o cizalla

Para los ingenieros químico e hidráulico, cizallamiento significa el deslizamiento de dos partes contiguas de un cuerpo en una dirección paralela al plano de contacto, bajo la influencia de una fuerza tangencial a la sección en la cual actúa, sin embargo para el tecnólogo en alimentos esa denominación puede describir la acción de “corte”, causando la división del producto en dos piezas. El aparato más conocido es la llamada “Cuchilla de Warner-Bratzler”, ampliamente utilizada para medir la ternura de la carne. El parámetro que se mide es la “fuerza máxima de cizallamiento” pero el aditamento montado en un texturómetro, permite obtener las curvas de fuerza vs. distancia y de aquí calcular otros parámetros tales como: elasticidad aparente, fuerza en la primera ruptura, área bajo la curva de compresión, etc. A pesar de que la técnica ha sido muy cuestionada en la literatura, como forma de reflejar la evaluación

sensorial de la ternura, trabajos realizados en el IIIA, acoplado la cuchilla a una máquina Instron, han ofrecido correlaciones significativas ($r = 0,76$) para el lomo de res (De Hombre y González, 1983) y para el lomo de cerdo ($r = 0,71$). En estos estudios se ha comparado este método con la compresión uniaxial de una muestra cilíndrica y en ambos tipos de carne, las correlaciones más elevadas fueron obtenidas con la cuchilla de Warner-Bratzler.

Voisey en Canadá, desarrolló un aparato de cizallamiento utilizando la misma cuchilla de Warner-Bratzler pero montada en un aparato donde puede registrarse la fuerza de cizallamiento (Voisey y col, 1965). El diseño del aparato es compacto, económico y tiene las ventajas de poseer un amplio rango de sensibilidades, precisión en la medición y reproducibilidad de las condiciones de la prueba. Otros instrumentos basados en este tipo de prueba son el Tenderómetro para guisantes desarrollado por la American Can Company a finales de la década del 30, el Tenderómetro MIRINZ para carne de mediados de los 60 y el Tenderómetro NIP de Smith y Carpenter (1973) también para carnes.

Extrusímetros y pruebas de extrusión

Estos instrumentos no han sido muy populares, pero han sido usados como índice de la calidad textural de líquidos muy viscosos, geles, mermeladas para untar, rellenos de pasteles, pastas cárnicas y productos grasos. También en los casos de alimentos que contengan partes sólidas y líquidas como son: frijoles enlatados, trozos de frutas en sirope y otros.

El extrusor del FIRA-NIRD descrito por Prentice (1954) ha sido uno de los más utilizados en productos grasos tales como mantequilla y margarina. El instrumento registra automáticamente la fuerza requerida para extruir la muestra cuando se fuerza a pasar a través de un orificio de 1/8 pulgada de diámetro a velocidad constante. La prueba llevada a cabo en un texturómetro, consiste en aplicar una fuerza al alimento para forzarlo pasar a través de un espacio restringido (orificio, ranura, espacio anular, etc). Generalmente se mide la "fuerza máxima de extrusión" como una medida de la textura aunque se ha medido también, la fuerza media en el plato y el área bajo la curva. Una curva típica obtenida en un texturómetro universal se aprecia en la figura 3.8.

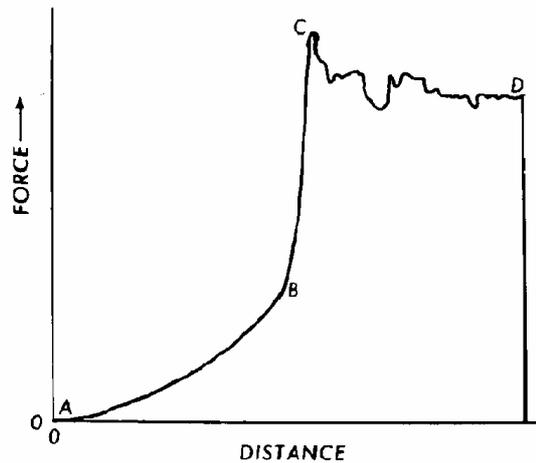


Figura 3.8. Curva típica de extrusión

La forma y magnitud de la curva de extrusión está influenciada por la elasticidad, viscoelasticidad, viscosidad y comportamiento en la ruptura del material, por el tamaño de muestra, la velocidad de deformación, la temperatura y el tipo de extrusímetro utilizado y homogeneidad de la muestra (Voisey y col., 1972). Por lo general, se alcanza un plato horizontal donde la fuerza permanece prácticamente constante.

El Dr. Malcolm C. Bourne de la Universidad de Cornell en Nueva York ha dedicado muchos artículos a describir el funcionamiento y los resultados obtenidos en diversos productos, utilizando pruebas de “extrusión por retroceso”. A partir de su trabajo sobre extrusión de guisantes (Bouton y col., 1968) lograron desarrollar extensamente la técnica con resultados altamente satisfactorios para los casos de alimentos que contienen mezcla sólido-líquido.

Más recientemente, el Dr. J. Steffe de la Universidad de Michigan junto al Dr. F. Osorio de la Universidad de Santiago de Chile (Steffe y Osorio, 1987; Osorio y Steffe, 1991; Osorio y col, 1992) han extendido la utilización de la técnica para calcular diversos parámetros reológicos de alimentos fluidos muy viscosos y la definen como “prueba de retroextrusión”, la cual consideran muy útil en el estudio reológico de pastas porque permite obtener fuerzas muy grandes como las que se requieren para generar el flujo en productos muy viscosos. La técnica de retroextrusión ha tenido otros seguidores como han sido Castro y col. de la Universidad de Chile, los cuales trabajando con manjar blanco, no encontraron diferencias significativas de los resultados del valor “n”

(exponente de la ley de potencia) con las pruebas estacionarias en reómetro de cono y plato (Castro y col, 1998).

La celda de extrusión de Ottawa, diseñada por Voisey (1970) la cual consiste de una caja cerrada en el extremo inferior por un sistema de alambres o un plato perforado, y un pistón que fuerza al material extruirse por alguno de estos sistemas que son intercambiables, ha sido utilizada extensamente para evaluar la textura de productos del mar con magníficos resultados (Voisey, 1971). A partir de las curvas fuerza vs. deformación que se obtienen, pueden calcularse diversos parámetros que el mismo autor designa como: dureza, cohesividad y masticabilidad, entre otros.

Pruebas de flexión y doblado

Se utiliza para alimentos en forma de barra cilíndrica o láminas tales como spaghetis, galletas, barras de chocolate, embutidos y frutas y vegetales frescos tales como: plátano, pepino y zanahoria.

En algunos casos, la muestra puede colocarse sobre un puente, con apoyo en dos puntos y la fuerza se aplica en el centro con la intención de deformar (partir, flexionar, etc) el producto; en otros, la muestra está fijada en uno de sus extremo en posición horizontal y se ejerce la fuerza en el extremo opuesto (Fig. 3.9).

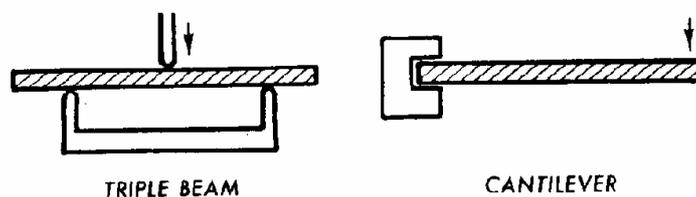


Figura 3.9. Esquema de pruebas de flexión

La primera es una prueba muy simple que puede acoplarse a cualquier tipo de texturómetro y se utiliza fundamentalmente para determinar las propiedades de “crujencia” en productos secos de cereales o bien en vegetales frescos. El Struct-0-Graph que introdujo en el mercado la Compañía Brabender, se basa en este principio y se utiliza para medir la fuerza de fractura de productos quebradizos.

Con el segundo tipo de prueba, se reportan pocos trabajos realizados en los últimos años a pesar de que existen algunos instrumentos basados en este principio entre otros el medidor de textura para papas fritas donde la fuerza que actúa es la gravedad (Anónimo, 1966). Los productos crujientes se caracterizan por una textura rígida a la flexión que se rompe rápidamente una vez que se alcanza la “fuerza de fractura”. Bruns y Bourne (1975) después de un análisis de la teoría matemática de la ingeniería, derivan una ecuación para medir la “fuerza de fractura” de barras uniformes con sección transversal rectangular:

$$F = 2/3 \sigma b h^2 / L \quad (86)$$

Donde: F es fuerza de fractura; σ es esfuerzo de fractura; b es ancho del puente; h es el espesor de la muestra y L es la longitud del puente entre los soportes.

Si la muestra es de sección transversal circular, de radio R , la ecuación sería:

$$F = \sigma \pi R^3 / L \quad (87)$$

En los ensayos realizados con un texturómetro y esta prueba, se aprecia un rápido incremento de la fuerza hasta un punto máximo donde se fractura el material y la fuerza disminuye inmediatamente después de este punto, lo cual denota características crujientes en los productos. Sin embargo, si el producto no es crujiente, existe una región donde ocurre la deformación elástica y la ruptura ocurre lentamente. Voisey y Wasik (1978) estudiaron los factores que

afectan la resistencia a la fractura de spaghetti crudo mediante la prueba de flexión en un puente, acoplado a una máquina Instron a diferentes velocidades de deformación. Concluyen que la resistencia a la fractura está influenciada por la velocidad de deformación pero mediante esta prueba pueden detectarse diferencias entre muestras.

Voisey y Stanley (1979) utilizaron varias pruebas instrumentales (cuchilla Warner-Bratzler modificada), prueba de tensión, prueba de penetración, prueba de doblado y la celda de compresión-cizallamiento del Sistema de Prueba de Textura para obtener las curvas de fuerza-deformación del bacon cocido a diferentes tiempos de cocción. Los autores señalan que una simple inspección de las formas y características de las curvas obtenidas, pueden ser una demostración rápida de cuánto afecta la cocción la textura del bacon. En la prueba de flexión utilizada se aprecia perfectamente esta observación de los autores (Fig.3.10), donde el pico de fractura se hace más pronunciado a medida que se incrementa la “crujidez” del producto.

Un trabajo más extenso sobre el mismo tema fue publicado posteriormente por Stanley y Voisey (1979) donde se ampliaron el número de pruebas instrumentales, se llevó a cabo la evaluación sensorial del producto a diferentes tiempos de cocción y se analizó la estructura mediante diferentes técnicas microscópicas.

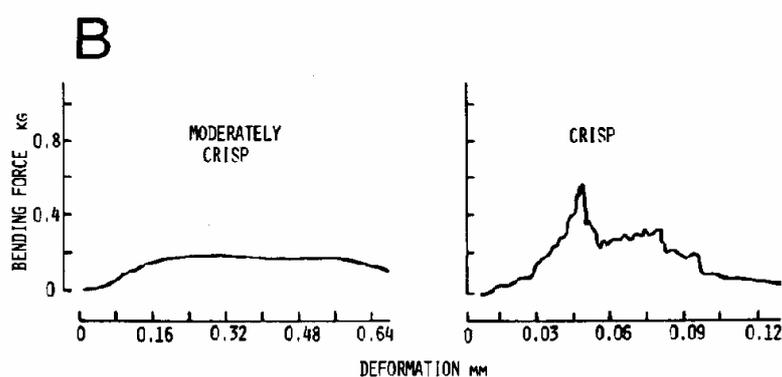


Figura 3.10. Pruebas de flexión para bacon cocido

Más recientemente, De Hombre y col. (1998) han utilizado la prueba montada en una máquina Instron para medir la “fuerza de fractura” de barras de chocolate. Realizando el trabajo a diferentes velocidades de deformación y empleando un grupo de jueces adiestrados en el Análisis del Perfil de Textura, se midió la “fragilidad” estimando la fuerza necesaria para partir el producto con las manos. La fuerza de fractura se correlacionó significativamente con la evaluación sensorial ($r = 0,94$), al emplear una velocidad de deformación de 10 cm/min. La prueba ha sido adoptada como método estándar para el análisis de la textura de barras de chocolate.

Pruebas de torsión

En una prueba de torsión, se aplica una fuerza que tiende a girar una parte del material alrededor de un eje. La tendencia de esta fuerza a provocar la rotación se llama torque (T), de manera que:

$$T = F \cdot R \quad (88)$$

Donde F es la fuerza aplicada al cuerpo a una distancia R del eje de rotación.

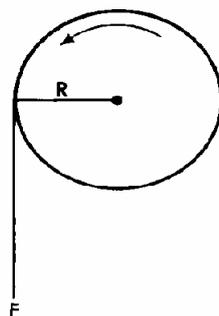


Figura 3.11. Esquema de torsión de un cuerpo

El Farinógrafo y el Mixógrafo son instrumentos basados en este principio y se utilizan para determinar las propiedades de panificación y manipulación de las harinas para pan.

Diehl y col. (1979) han diseñado un aditamento de torsión para ser utilizado en el Instron y medir el rompimiento estructural de manzana, papa y melón. Estos autores concluyen señalando que la torsión es, en muchos casos, es preferible a la compresión uniaxial para medir el rompimiento de estos productos.

Pruebas de tensión

Estas pruebas no son muy utilizadas en alimentos porque la masticación supone una compresión del alimento entre los molares y no tensión. Varios instrumentos se han diseñado y construido basados en esta prueba, como es el Extensógrafo Brabender que se utiliza junto al Farinógrafo para evaluar propiedades reológicas de la miga del pan en laboratorios asociados con la industria molinera y de productos horneados. En este caso, de la curva obtenida, pueden calcularse: la resistencia a la extrusión; la extensibilidad y la energía. Con la proliferación de diversos tipos de máquinas universales de prueba, los ensayos de tensión son generalmente desarrollados en estos equipos.

En una prueba convencional de tensión, la muestra se fractura casi instantáneamente en un plano aproximadamente perpendicular al plano donde actúa la fuerza de tensión. La fuerza máxima es la resistencia a la tensión del material. En muchos alimentos el material no se fractura rápidamente, sino que comienza a romperse lentamente en un período de tiempo relativamente largo y la fractura puede o no ocurrir en el plano perpendicular a la fuerza aplicada. Esto hace que sea dificultoso interpretar las mediciones de la fuerza de tensión. Las pruebas de tensión pueden utilizarse para medir la adhesión de un alimento a una superficie como ha sido la medición de la adhesividad (hesión) de la mantequilla (Jansen, 1961; Claassens, 1958). Henry y Katz (1969) usaron esta técnica en una máquina Instron para medir adhesividad de pudines y desarrollaron y adaptaron varios parámetros de tensión a partir de la curva

fuerza vs. distancia. Bouton y Harris (1978) (citado por De hombre, 1986) encontraron correlaciones altamente significativas para carne de res entre una prueba de tensión en un Instron y la medición de la ternura mediante la cuchilla de Warner-Bratzler. Hayward y col. (1980) utilizando un Instron, midieron la “fuerza de ruptura en tensión” que denominaron como “adhesión” para estudiar los efectos de tenderización por cuchillas del lomo de res. La correlación con la evaluación sensorial de la ternura fue significativa pero con valor muy bajo ($r=0,20$). En general, la mayoría de los estudios realizados empleando pruebas de tensión han sido desarrollados en carnes y productos cárnicos.

Otros tipos de pruebas

El Tenderómetro para guisantes de la Food Machinery Corporation (FMC) se desarrolló para medir la calidad y el grado de maduración de guisantes verdes frescos. Comúnmente se considera como un instrumento basado en prueba de cizallamiento, pero es evidente que la acción que mayormente se ejerce sobre el guisante es la extrusión.

Otro instrumento basado en una prueba compleja y desarrollado por la Universidad de Maryland (Kramer, 1951) es la llamada Prensa de Cizallamiento de Kramer (Fig. 3.12). El aditamento de prueba consiste en lo esencial de un juego de láminas de 1/8 pulgada de espesor que se mueve de forma vertical por unas ranuras en una caja donde se coloca el producto.

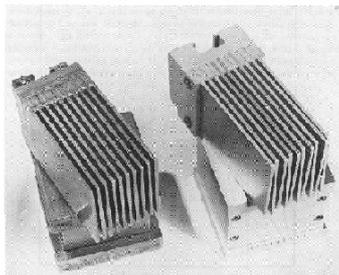


Figura 3.12. Celda de Kramer

Aunque los diseños de esta celda han cambiado considerablemente desde su invención, la tan conocida celda de Kramer es de gran utilidad en el análisis de la textura de gran variedad de alimentos sólidos, ya que puede

acoplarse a cualquier tipo de texturómetro. En la figura 3.13 se muestran algunas curvas típicas obtenidas para varios alimentos. Por lo general se mide la “fuerza máxima de cizallamiento” pero se conoce que se produce una combinación de compresión, extrusión y cizallamiento (Szczeniak y col., 1970).

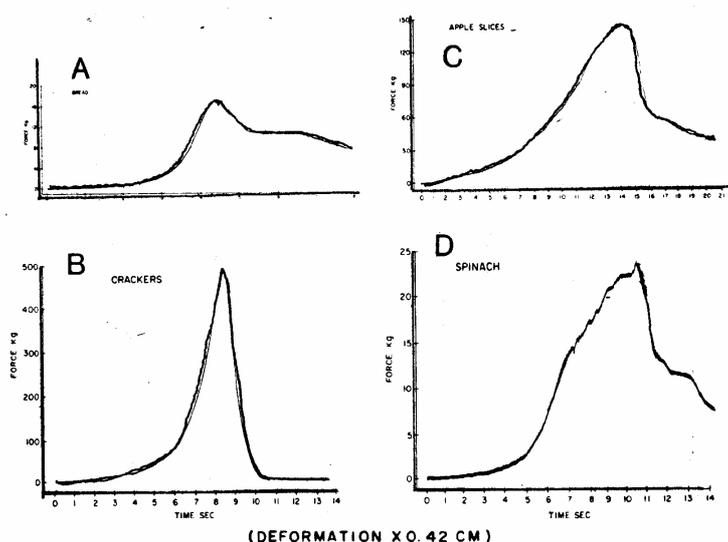


Figura 3.13. Curvas típicas obtenidas por la celda Kramer, para diferentes alimentos

La prueba, utilizando la celda de cizallamiento de Kramer, ha sido muy útil en diversos trabajos desarrollados en el IIIA. Para los casos de conservas de frutas y vegetales (trozos de frutas en sirope, ensalada de vegetales, vegetales encurtidos, etc.) ha ofrecido la gran ventaja de poder evaluar la textura del producto en su conjunto a pesar de que el producto puede presentarse en diversas formas y tamaños (heterogéneo). Todos los estudios realizados para tratar de dar solución a los problemas de selección de variedades de frutas para la industria, han incorporado la utilización de esta celda acoplada a una máquina Instron y en la gran mayoría de los casos, sus resultados han ofrecido magníficas correlaciones con la evaluación sensorial (De Hombre y col., 1988). Este mismo aditamento también se ha utilizado para productos crujientes tales como hojuelas de maíz y rizos de maíz (Beltrán y De Hombre, 1988). Debido a la variabilidad de formas y tamaños de estos productos, resultaría extremadamente laborioso tratar de medir la textura pieza por pieza por cualquier otro método. La cajuela donde se coloca la muestra

puede recibir un peso dado de muestra por lo que la heterogeneidad del producto no resulta inconveniente en este caso y solo se requiere mantener una determinada masa de producto a evaluar. Un estudio sobre la influencia del tiempo de almacenamiento en el endurecimiento de frijoles negros que se importan en Cuba ha indicado que los resultados obtenidos utilizando la celda de Kramer son capaces de diferenciar entre distintos tratamientos para producir un ablandamiento de aquellos frijoles con más de 6 meses de almacenamiento además de mostrar los cambios en textura con el tiempo durante el almacenamiento en diferentes condiciones (Mendez y De Hombre, 1994).

Máquinas universales

La máquina Instron es uno de los instrumentos universales más populares en la actualidad para realizar estudios de propiedades de esfuerzo vs. deformación de materiales. Puede utilizarse para realizar pruebas convencionales de tensión, compresión, penetración, cizallamiento, extrusión o doblado, pero también puede usarse en estudios de histéresis, relajación de esfuerzos, energía de deformación y otros. Bourne (1982) describe ampliamente su modo de operación, partes y componentes más importantes y presenta una tabla donde se recoge sus principales usos y aplicaciones.

En diversas instituciones y universidades del área iberoamericana, se ha extendido el uso de la máquina Instron para ensayos en alimentos, de tal manera que del total de máquinas o texturómetros que se reportan (aproximadamente 21), algo más del 50% corresponden al del tipo Instron (Aguilera, 1993). Sin embargo, en los últimos años el Analizador de Textura de la firma Stable Micro Systems (SMS), ha cobrado gran auge entre los especialistas de textura en el área iberoamericana así como en diversas empresas productoras de alimentos y materias primas para la industria de alimentos.



Figura 3.14. Medidor de textura de SMS

Con un diseño muy compacto, ligero y de dimensiones pequeñas, este nuevo texturómetro ha incrementado su popularidad además de que presenta múltiples opciones de celdas para diversos tipos de ensayos, tanto en tensión como en compresión y resulta más económico que otras máquinas universales. Cuenta además con un software para cálculos de los parámetros del perfil de textura, fatiga cíclica, relajación de esfuerzos y otras propiedades mecánicas. Los resultados pueden ser impresos de forma rápida y los datos de la prueba pueden compararse con resultados previos del análisis y transferirlos para análisis en computadora o presentación a través de programas Lotus o Excel. Tiene la ventaja además de incorporar un sistema de mensaje de aviso en caso de errores que permite que el problema o la dificultad que se presente, pueda ser solucionado.

REFERENCIAS

1. Aguilera, J. M. (1993). Catastro iberoamericano de centros de investigación en propiedades físicas de alimentos. RIPFADI-CYTED.
2. Aguilera, J.M. y Durán, L, (1996). Glosario de Términos Reológicos en español y portugués. CYTED-RIPFADI, Valencia, España.
3. American Association of Cereal Chemists, (1988). Cereal Laboratory Methods No. 74-09. Amer. Ass. of Cereal Chem., St. Paul, Minnesota.
4. Anónimo, (1966). A new instrument for measurement the texture of potato french fries. Am. Potato, J. 43, 175.
5. Beltrán, M. y De Hombre, R. (1988). Análisis de la textura de hojuelas y rizos de maíz. 1ª Conferencia Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, La Habana, Cuba.
6. Bertola, N.; Bevilaqua, A., Zaritzky, N. (1994). Heat treatment effect on texture changes and thermal denaturation of proteins in beef muscle. J. Food Processing and Preservation, 18, 31-46.
7. Bertola, N.; Bevilaqua, A.; Califano, A. y Zaritzky, N. (1998). Caracterización de la textura instrumental y el comportamiento viscoelástico de diferentes tipos de quesos. 1º Coloquio Internacional de Propiedades Físicas de Alimentos y Calidad, La Habana, Cuba.
8. Bloksma, A. H. (1972). Rheology of wheat flour doughs. J. Texture Studies 3,3.
9. Bourne, M. C, (1966). Measurement of shear and compression components of puncture tests. J. Food Sci. 31, 282-291.
10. Bourne, M.C, (1968). Texture profile of ripening pears. J. Food Sci. 33, 223-226.
11. Bourne, M.C. (1982). Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. Food Sci. and Technol., Academic Press, N.Y.
12. Bouton, P.E., Bourne, M.C.y Moyer, J.C, (1968). The extrusion principle on texture measurement of fresh peas. Food Technol. 22, 1013.
13. Breene, W.M., (1975). Application of texture profile analysis to instrumental food texture evaluation. J. Text. Studies 6, 53-82.

14. Bruns, A.J. y Bourne, M.C. (1975). Effects of sample dimensions on the snapping force of crisp food. Experimental verification of a mathematical model. *J. Text. Studies* 6, 445-458.
15. Bryant, A., Ustunol, Z., Steffe, J. (1995). Texture of cheddar cheese as influenced by fat reduction. *J. of Food Sci.* 60(6), 1216-1236.
16. Castro, E. (1995). "Propiedades reológicas de emulsiones cárnicas para producir vienas" Tesis de Magíster en Ciencias de los Alimentos, U. de Chile. Santiago, Chile.
17. Castro, E., Rojo, O., Quitral, V., Rojas, D., (1996). Caracterización textural y reológica de un snack de chorito (*Mytilus chilensis*) congelado. *Alimentos* 21,3-4, 11-20.
18. Castro, E., Rojo, O., Arancibia, E., Jowitt, R., Osorio, F. (1996). Characterizing the texture of frankfurters. *Latin American Applied Research* 26, 241-245.
19. Castro, E., Guarda, A., Rojo, O., Martínez, J. (1997). "Propiedades texturales de pasas obtenidas por métodos combinados de deshidratación osmótica y secado con aire caliente" *Alimentos*, 22(1-2), 31 - 47.
20. Castro, E.; Miranda, M.; Osorio, F.; Vargas, M. y López, R. (1998). Retroextrusión y propiedades mecánicas de un derivado lácteo. VI Conferencia Internacional de Ciencia y Tecnol. de Alim., La Habana, Cuba.
21. Castro, E. (1999). En "Textura de los Alimentos", editor E. Castro.
22. Castro, E., Álvarez, P. (2002). "Evaluación sensorial de textura de quesos mantecosos". Primer congreso de estudiantes de ciencia y tecnología de alimentos, zona central. Santiago, Chile. 12-13 de Septiembre.
23. Castro, E., Verdugo, M., Miranda, M., Rodríguez, A., (2004). Determinación de parámetros texturales de galletas [en línea], 15 pág., [www.uchile.cl/biblioteca digital](http://www.uchile.cl/biblioteca_digital). "Determinación de parámetros texturales de galletas", PDF.documento digital.
24. Cadavieco, T. y De Hombre, R. (1982). Estudio de la textura de diferentes quesos de maduración. Tesis de Diploma. ISPJAE, La Habana.

25. Casals, C. y De Hombre, R. (1990). Selección de cultivares de mango para la industria. Informe interno, IIIA, La Habana.
26. Chen, P. y Fridley, R.B., (1972). Analytical method for determining viscoelastic constants of agricultural materials. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 15, 1103-1106.
27. Christensen, O. y Trudsoe, J. (1980). J. of Text. Studies 11: 137
28. Claassens, J.W. (1958). The adhesion-cohesion, static friction and macrostructure of certain butters. I. A method of measuring the adhesion-cohesion of butter. J. Afr.- Tydskr. Landbouwet. 1, 457-463.
29. Cornford, S. J., Axford, D. W. E. y Elton, G. A. H. (1964). The elastic modulus of bread crumb in linear compression in relating to staling. Cereal Chem. 41,216.
30. Cumming, y col, 1971. Cumming, D:B:J:, De Man, J.M., Lynch, A.G., Matens, W. G. y Tanaka, M. 1971. Food Texture Measurement in Canada. J. Texture Stud. 2, pp 441 – 450.
31. De Hombre, R., 1979. Encuesta sobre instrumentos reológicos en la industria cubana de alimentos. Informe interno, IIIA.
32. De Hombre, R. y González, E. (1983). Análisis de la textura de la carne de res: influencia de la raza, el sexo y la edad sobre la ternura. Informe interno, IIIA.
33. De Hombre, R y Díaz, J.A. (1984). “Influencia de algunos factores tecnológicos sobre las propiedades reológicas del Yogur y métodos para su control industrial en Cuba”. Tesis Doctoral (Ph. D), Ciudad Habana, Cuba.
34. De Hombre, R. y Piñera, R. (1985). Selección de cultivares de papaya, guayaba y mango para la industria. Informe interno, IIIA.
35. De Hombre, R. (1986). Folleto del curso de Reología y Textura de los Alimentos. Ediciones III A. La Habana. Cuba.
36. De Hombre, R.; Hernández, A. y Díaz Abreu, J.A. (1986). Análisis de la textura de quesos semiduros. Comunicación personal.
37. De Hombre, R. (1988). Utilización de extensores en embutidos de pasta fina. 1ª Conferencia Internacional de Ciencia y Tecnol. de Alimentos, La Habana, Cuba.

38. De Hombre, R.; Piñera, R.M. y González, E. (1988). Selección de cultivares de guayaba y mango para la industria. 1º Conferencia Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, La Habana, Cuba.
39. De Hombre, R. (1994a). Técnica para determinar fuerza de gel. NEIAL 6737-051/1994.
40. De Hombre, R. (1994c). Quesos y Embutidos de Pasta Fina. Determinación de los Parámetros del Perfil de Textura. NEIAL 6737-049.
41. De Hombre, R. Y Rodríguez, J. (1995). Método de control de la consistencia de la mayonesa en prensa.
42. De Hombre, R; Rodríguez, I y Jorge.M. C. (1998). Estudio de correlación instrumento-sensorial de la textura de barras de chocolate. 1º Coloquio Internacional de Propiedades Físicas de Alimentos y Calidad, Proyecto XI.5 CYTED, La Habana, Cuba.
43. De Hombre, R. (2000). Comunicación personal.
44. De Hombre, R. (2001). Comunicación personal.
45. De Hombre, R. (1997). Comunicación personal.
46. De Hombre, (1998). Comunicación personal.
47. DeMan, J. M, (1969). Food texture measurement with the penetration method. J. Text. Studies 1, 114-119.
48. DeMan, J.M.; Dobbs, J.E.; y Sherman, P. (1979). Spreadability of butter and margarine. En "Food Texture and Rheology, eds. P. Sherman . Academic Press.
49. Díaz y Hernández, (1994). Díaz Abreu, J.A. y Hernández, A.E., 1994. Empleo de propiedades y estudio reológicos para perfeccionar y controlar la elaboración y calidad de los quesos. Nota técnica. Boletín RIPFADI(CYTED), Febrero, IPN, México.
50. Diehl, K.C; Hamann, D.D. y Whitfield, J.K, (1979). Structural failure in selected raw fruits and vegetables. J. Text. Studies 10, 371-400.
51. Dixon, G.P.O. y Parekh, J.V. (1979). Use of the cone penetrometer for testing the firmness of butter. J. Text. Studies 10, 421-434.
52. Elton, G. A. H., (1969). Some quantitative aspects of bread staling. Bakers Digest 43(24),76.

53. Finney, E.E. Jr. y C.W. Hall, (1967). Elastic properties o potatoes. Trans. ASAE 10, 4-8.
54. Finney, E.E. Jr. y K.H. Norris, (1968). Instrumentation for investigating dynamic mechanical properties of fruits and vegetables. Trans. ASAE 11, 94-97.
55. Finney, E.E. (1973). Elementary Concepts of Rheology Relevant to Food Texture Studies, in "Texture Measurements of Foods. A. Kramer y A.S. Szczesniak, eds. D. Reidel Pu. Co., pp 33-51.
56. Finkowski, .W. y Peleg, M. (1981). Some rheological characteristics of soy extrudates in tension. J. Food Sci. 46, 207-211.
57. Finney, E.E. (1969). Objective measurement for texture in foods. J. Text. Studies 1, 19.
58. Friedman, H.H; Whitney, J.E y Szczesniak, A.S, (1963). The Texturometer: a new instrument for objective texture measurement. J. Food Sci. 28, 390-396.
59. Gamero, M., Fiszman, S.M. y Durán, L. (1993). Stress relaxation of fruit gels. Evaluation of models and effects of composition. J. Food Sci. 58(5), 1125-1128.
60. Gámbaro, A., Varela, P., Giménez, A., Aldrovandi, A., Fiszman, S. M., Hough, G. (2002). Textural quality of white pan bread by sensory and instrumental measurements. J. Texture Studies, 33, 401-413.
61. Garrido, E., Castro, E., López, R, Salinas, N. (2004). Desarrollo de un mejorador de panificación para aumentar la vida útil del pan de molde. XV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 25 Agosto, Viña del Mar, Chile.
62. Gordon, A. (1969). Food Texture. A survey of some of the more recent work in this field. Food Proc. & Marketing 38, 54.
63. Hayward, L., Hunt, M., Kestner, C. y Kropf, D. (1980). Balde tenderization effects on beef longissimus sensory and Instrum Textural measurements. J. Food Sci., 45, 925-935.
64. Hernández y Díaz, (1989). Hernández, A.E. (Tutor: Díaz, J.A.) 1989. Desarrollo y aplicación de técnicas reológicas para la optimización y el control del proceso

tecnológico en quesos semiduros. Tesis de Doctor en Ciencias Técnicas (Ph.D.), Inst. Superior Politec. J. A. Echeverría (ISPJAE), La Habana, Cub.

65. Hagger, H. (1997). Contribución al estudio de las propiedades texturales del mazapán. Tesis para optar al título de Ingeniero en Alimentos, Fac. de ciencias agrarias, Universidad Austral de Valdivia. Valdivia Chile.

66. Haighton, A. J. (1959). The measurement of hardness of margarine and fats with cone penetrometers. J. Am. Oil Chem. Soc. 36, 345-348.

67. Heiss, R. y Witzel, H. (1969). Objective methods for measurement of consistency in solid foods. Z. Lebensmittel-Unters. und Forsch. 141, 67.

68. Henry, W.F. y Katz, M.H. (1969). New dimensions relating to the textural quality of semisolid food and ingredient systems. Food Technol. 36, 155-161.

69. Iglesias, I. y De Hombre, R. (1994). Estudio de diferentes variedades de cebolla y efecto de la irradiación sobre la conservación durante el almacenamiento. IX Seminario Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos., La Habana, Cuba.

70. Jansen, K. (1961). Hesion and consistency of butter. J. Dairy Res. 28, 15-20

71. Johnson, E.A., Separs, R.A., Karsalis, J.G., Normand, M.D., Peleg, M. (1980). Evaluation of the compressive deformability modulus of fresh and cooked fish flesh J. Food Sci. 45, 1318 -1319, 1326.

72. Kramer, A. (1951). Objective testing of vegetable quality. Food Technol. 5, 265-269.

73. Kramer, A. y Twigg, B.A. (1966). En "Fundamental of Quality Control for the Food Industry. Capítulos 4 y 7. The Avi. Pu. Co., Westport, Conn.

74. Kaletung, G., Normand, M. D., Johnson, E. A., Peleg, M. (1991). Degree of elasticity determination in solid foods. J. Foods Sci. 56(4), 950-953.

75. Kaletung, G., Normand, M. D., Johnson, E. A., Peleg, M., (1992). Instrumental determination of elasticity of marshmallow. J. Texture Studies 23, 47-56.

76. Kawas, M. L., Moreira, R. G. (2001). Effect of degree of starch gelatinization on quality attributes of fried tortilla chips. J. Food Sci. 66(2), 300-306.

77. Kaletung, G., Normand, M.D., Nussinovitch, A. y Peleg, M. (1991) Determination of elasticity of gels by successive compression-decompression cycles. *Food Hydrocolloids* 5 (3). 237-247.
78. Ker, Y. C., Toledo, R. T. (1992). Influence of shear treatment on consistency and gelling properties of whey protein isolate suspensions. *J. Food Sci.* 57, 82-90.
79. Kong, C. S., Tashiro, Y., Ogawa, H., (2001). Elastic modulus of surimi protein and starch in fish-meat gel with added starch pregelatinized at 2 temperatures. *J. Food Sci.* 66(8), 1138-1142.
80. Kaletung, G., Normand, M.D., Johnson, E.A., Peleg, M. (1992). "Instrumental determination of elasticity of marshmallow" *Journal of Texture Studies*, 23, 47-56.
81. Mohsenin, N.N. y J.P. Mittal, (1977). Use of rheological terms and correlation of compatible measurements in food texture research. *J. Texture Stud.* 8, 395-408.
82. Mukai, T., Watanabe, N., Toba, T., Itoh, T., Adachi, A. (1991). Gel-forming characteristics and rheological properties of kefir. *J. Food Sci.* 56(4), 1017-1018, 1026.
83. Mohsenin, N.N. (1986). En "Physical Properties of Plant and Animal Materials, 2° Ed., Gordon and Breach, N.Y.
84. Morrow, C.T. y Mohsenin, N.N., (1966). Consideration of selected agricultural products as viscoelastic materials. *J. Food Sci.* 31, 686-698.
85. Mao, R., Tang, J. Y Swanson, B.G. (2000). Relaxation time spectrum of hydrogels by CONTIN Análisis. *J. Food. Sci.* 65(3), 374-381.
86. Magness, J.R. y Taylor, G.F. (1925). An improved type of pressure tester for the determination of fruit maturity. U.S. Dep. of Agric. Circ. No. 350.
87. Mendez, V. y de Hombre, R. (1994). Endurecimiento de frijoles negros durante su almacenamiento. 4ª Conferencia Internacional de Ciencia y Tecnol. de Alimentos, La Habana, Cuba.
88. Miller, B.D.F., Peleg, M., Normand, M.D., Gonter, R.H., Klein, E. (1986). "A computer aided method for the rheological characterization and classification of solid food materials" *J. Food Sci.* 51, 123.

89. Muller, H.G., (1969). Routine rheological tests in the British food industry. *J. Food Technol.* 4, pp 83-92.
90. Nussinovitch, A., Peleg, M., Normand, M.D. (1989). "A modified Maxwell and non exponential model for characterization of the stress relaxation of agar and alginate gels. *J. Food Sci.* 54, 1013-1016.
91. Osorio, F. y Steffe, J.F. (1991). Evaluating Herschel-Bulkley fluids with back extrusion (annular pumping) technique. *Rheological Acta* 30, 549-558.
92. Osorio, F.A.; Marte, N.J. y Steffe, J.F, (1992). Nota: Retroextrusión de fluidos que siguen la ley de potencia. Influencia de los efectos terminales. *Rev. Esp. de Ciencia y Tecnol. Alim.* 32(2), 207-212.
93. Peleg, M. (1976). "Considerations of a general rheological model for the mechanical behavior of viscoelastic solid food material" *J. Texture Studies.* 7, 243 -256.
94. Peleg, M., Calzada, J.F. (1976). "Stress relaxation of deformed fruits and vegetables" *J. Food Sci.* 41, 1325 -1329.
95. Peleg, M. (1977). "Operational conditions and the stress - strain relationship of solid foods" *J. Texture Studies.* 8, 283.
96. Peleg, M. (1979). "A model for creep and early failure" *Mater. Sci. Eng.* 40, 197 - 205.
97. Peleg, M. (1979). "Characterization of stress relaxation curves of solid foods" *J. Food Sci.* 44, 277 - 281.
98. Peleg, M., Pollak, N. (1982). "The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analyses of solid food" *J. Texture Studies* 13, 1 - 11.
99. Peleg, M., Normand, M.D. (1982). "A computer assisted analysis of some theoretical rate effects in mastication and in deformation testing of foods" *J. Food Sci.* 47, 1572 - 1577.
100. Peleg, M. (1983). "Stress and strain activated fracture elements" *J. Texture Studies.* 14, 87 - 98.
101. Peleg, M., Isabelle, Roy, Campanella, O.H. y Normand, M.D. (1989). "Mathematical characterization of the compressive stress - strain relationship of spongy baked goods" *J. Food Sci.* 54, 947.- 949.

102. Pollak, N. y Peleg, M. (1980). "Early indications of feature at large compressive deformations" J. Food Sci. 45, 825.
103. Purkayastha, S., Peleg, M., Johnson, E.A., Normand, M.D. (1985). "A computer aided characterization of the compressive creep behavior of potato and cheddar cheese" J. Food Sci. 50, 45 - 50, 55.
104. Pedersen, J. K. (1980). A/S Kovenhavns Pektinfabrik. Copenhagen, Dinamarca. Comunicación personal.
105. Prentice, J.H. (1954). Lab. Pract. 3, 186.
106. Purkayastha, S., Peleg, M.(1986). Comparison between projected mechanical equilibrium conditions of selected food materials in stress relaxation and creep. J. TextureStudies, 17, 433-444.
107. Peleg, M. (1994). A model of mechanical changes in biomaterials and around their glass transition. Biotechnol. . Prg. 10,385-388.
108. Rodríguez, A., Castro, E., Salinas, M. C., López, R., Miranda, M. (2001). Interesterification of tallow and sunflower oil. JAOCS 78 (3), 431-436.
109. Rodríguez, A., Bungler, A., Castro, E., Sousa, Y., Empis, J. (2003). Development and optimization of cultured goat cream butter. JAOCS 80 (10), 987-992.
110. Roos, Yrjö H. (1995). "Phase transitions in foods" Academic Press Limited, USA.
111. Roy, I. y Peleg, M. (1989). An empirical model for the force-deformation relationships of cylindrical food specimens in quasi-static radial loading. J. Text. Studies 19, 453-463.
112. Roennegard, E. y Dejmek, P. (1994). "Development and breakdown of structure in yoghurt studied by oscillatory rheological measurements". Lait 73 (4): 371-379.
113. Sharma, M. (1965). "Theory of phenomenological viscoelasticity underlying mechanical testing". En Testuring of Polimers, vol I (J. V. Schmists, ed) pp147-199. Interscience Pub., N.Y.
114. Somers, G. F. (1965). Viscoelastic properties of storage tissues from potatoes, apple and pear. J. Food Sci. 30,922.

115. Swyngedau, S., Normand, M.D., Peleg, M. (1991). "Comparison of two types of models for concave force-deformation curves presentation" *J. Texture Studies* 22, 265-275.
116. Smith, G.C. y Carpenter, Z.L. (1973). Mechanical measurement of meat tenderness using the NIP Tenderometer. *J. Texture Stud.* 4, 196-203.
117. Stanley, D.W. y Voisey, P.W. (1979). Texture structure relationships in bacon adipose tissue. En "Food Texture and Rheology, ed. P. Sherman, Academic Press. N.Y.
118. Steffe, J.F. y Osorio, F.A. (1987). Retroextrusión de fluidos no newtonianos. *Rev. de Agroq. y Tecnol. Alim.* 27 (3), 317-327.
119. Szczesniak, A.S; Humbaugh, P. R. y Block, H.N, (1970). Behavior of different foods in the standard compression cell of the shear press and the effect of sample weight in peak area and maximum force. *J. Texture Stud.* 1, 356.
120. Saldo, J., Sendra E., Guamis, B., (2000). High hydrostatic pressure for accelerating ripening of goat's milk cheese: proteolysis and texture. *J. Food Sci.* 65(4), 636-640.
121. Sharma, M.G. y N.N. Mohsenin, (1970). Mechanics of deformation of a fruit subjected to hydrostatic pressures. *J. Agric. Eng. Res.* 15(1), 65-74.
122. Szczesniak, A.S. (1963). *J. Food Sci.* 28, 410-420
123. Solomon, W. K. y Jindal, V. K., (2003). Comparison of mechanical test for evaluating textural changes in potatoes during thermal softening. *J. Texture Studies*, 33, 529-542.
124. Voisey, P.W. (1970). Test Cells for Objective Textural Measurements. *J. Can. Inst. Food Sci. Technol.* 3, 93.
125. Voisey, P.W. (1971). Use of Ottawa Texture Measuring System for testing fish products. Contribution No.244. *Eng. Res. Service. Canada Dpt. Of Agriculture.*
126. Voisey, P.W. y Stanley, D.W. (1979). Interpretation of instrumental results in measuring bacon crispness and brittleness. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 12(1), 7-15.

127. Voisey, P.W. y Wasik, R, (1978). Measurement the strength of uncooked spaghetti by the bending test. *Can. Inst. Food Sci. J.*, 11(1), 34-37.
128. Voisey, P.W.; Hansen, H. Y Thomlison, A. W. (1965). A recording shear apparatus for evaluating meat tenderness. Eng. Specification 6411. Eng. Res. Service, Canada Dpt. of Agriculture.
129. Voisey, P.W; Mac Donald, D-C.; Kloek, M. y Foster, W. (1972). The Ottawa Texture Measuring System. An operational manual. Agric. Can. Eng. Spec. No. 7024.
130. White, R.K. y Mohsenin, N.N., (1967). Apparatus for determination of bulk modulus and compressibility of materials. *Trans. ASAE* 10(5), 670-671.
131. Yu, L., Hammond, E. G.,(2000). Production and characterization of a swiss cheese-like product from modified vegetable oils. *JAOCS*, 77(9), 917-924.
132. Yorrilla, S. E., Rovedo, C. O., Singh, R. P., (2000). A new approach to correlate textural and cooking parameters with operating conditions during double-rieded cooking of meat patties. *J. Texture Studies* 31, 499-523.
133. Zurita, E; Hernández, A.; y De Hombre, R. (1982). Cambios en la textura de quesos durante la maduración. Tesis de Diploma. ISPJAE. La Habana.

GLOSARIO

a	constante de la expresión de fuerza de deformación por capas
a	parámetro de la curva linealizada de relajación
a	recíproco del tiempo de relajación $\lambda \left(\lambda = \frac{1}{a} \right)$
a_i	coeficiente de la curva de relajación
a_0	constante de la curva de relajación
A	Amplitud, m
A_∞, A_1 y A_2	constantes que dependen de las propiedades viscoelásticas del material
b	ancho del puente, m
b	constante ecuación Peleg
b	parámetro de la curva linealizada de relajación
b	recíproco de la velocidad de deformación $V \left(b = \frac{H_0}{V} \right)$
b_i	coeficiente de la curva de relajación
B	constante modelo Maxwell
c	constante de la expresión de fuerza de deformación por capas
c_1, c_2, c_3	constantes de material esponjoso
C	valor de fluencia, Pa
C_0, C_1, C_2	parámetros del modelo modificado de Maxwell
E	módulo de Young o módulo elástico, Pa
E_d	módulo de decaimiento, Pa
E_e	módulo elástico de equilibrio, Pa
E_i	módulo de Young del elemento i , Pa
E_r	módulo de Young del elástico retardado, Pa
$E(t)$	módulo de relajación al tiempo t , Pa
E_D	módulo de deformabilidad, Pa
E_0	módulo elástico del elemento resorte del modelo de Kelvin, Pa
E_3, E_4	parámetros del modelo de Maxwell de dos elementos, Pa
E_∞	módulo de Young de equilibrio o módulo de equilibrio, Pa
F	fuerza de fractura, N
$F(t)$	fuerza a t minutos de relajación, N
F_0	fuerza a $t = 0$ de relajación, N
F^*	fuerza adimensional de relajación, adimensional
g	constante de gravedad, $9,81 \text{ ms}^{-2}$
G	módulo de rigidez o de cizallamiento, Pa
H_0	altura inicial, m
j_A	capacitancia asintótica, Pa^{-1}
$j(t)$	capacitancia corregida, Pa^{-1}
k_i	constante de resorte, adimensional
k_1	parámetro de la curva normalizada de relajación

k_0, k_1, k_2, k_3 y k_4	constantes de la capacitancia asintótica, adimensional
K	constante ecuación Peleg, adimensional
K	módulo de compresión volumétrica, Pa
K	medida de dureza, (fuerza/longitud ²), Nm ²
K_1	velocidad inicial de relajación, ms ⁻¹
K	constante de la expresión de Haighton
L	longitud del puente, m
M	módulo de deformabilidad, Pa
n	medida de desviación, adimensional
n	constante modelo Maxwell, adimensional
N	Número de elementos de Maxwell activos a la deformación ε
N_0	Número inicial de elementos
p	profundidad penetración cono, m
R	Radio, m
t_{ret}	tiempo de retardo, s
T	Torque, Nm
V	velocidad del cabezal, ms ⁻¹
w_f	trabajo en la rotura, Jkg ⁻¹
W	peso cono de la expresión de Haighton, kg
x	fracción de elementos elásticos
X	parámetro variable
X_C	constante ecuación Peleg, adimensional
Y	función normalizada de la curva de relajación, s
$Y(X)$	Parámetro mecánico que representa elasticidad (módulo, módulo de almacenamiento, esfuerzo de ruptura), pegajosidad (área bajo la curva esfuerzo deformación)
Y_0	magnitud de $Y(X)$ en el punto de referencia
ΔH	deformación absoluta, m
ΔH_T	deformación total del arreglo analizado, m
ΔH_i	deformación de la capa i , m
ΔV	cambio de volumen, m ³
ε	deformación unitaria, adimensional
ε	función de masticación, Peleg y Normand, (1982)
ε_{ci}	deformación de ruptura del elemento i
ε_f	deformación en la rotura, m
$\varepsilon(t)$	deformación unitaria real, adimensional
ε_t	deformación total, adimensional
ε_v	deformación volumétrica unitaria, adimensional
ε_E	deformación elástica, adimensional
ε_E	deformación unitaria elástica, adimensional
ε_X	deformación unitaria a tiempo infinito, adimensional
ε_0	deformación constante, adimensional
ε_η	deformación viscosa
ε_η	deformación unitaria viscosa, adimensional

$\dot{\epsilon}$	velocidad de deformación, s^{-1}
$\epsilon_H(t)$	deformación de Hencky, adimensional
η_i	viscosidad del elemento i, Pas
λ_i	tiempo de relajación del elemento i de Maxwell, Kelvin, adimensional
λ_{rel}	tiempo de relajación estimado, s
λ'	tiempo necesario para que en un modelo de Maxwell el esfuerzo disminuya a 1/e de un valor inicial, s
μ	coeficiente de Poisson, adimensional
σ	esfuerzo unitario, Pa
σ	esfuerzo de fractura, Pa
σ_d	esfuerzo de relajación residual, Pa
σ_d	esfuerzo de decaimiento, Pa
σ_e	esfuerzo de equilibrio asintótico, Pa
σ_f	esfuerzo en la rotura, Pa
σ_n	esfuerzo viscoso, Pa
σ_E	esfuerzo elástico, Pa
σ_η	esfuerzo viscoso, Pa
$\dot{\sigma}$	velocidad a la que se aplica la tensión, adimensional
$\sigma_{cor}(t)$	esfuerzo corregido, Pa
τ	tiempo de relajación, s
ω	frecuencia angular, $rads^{-1}$
$1/k_1$	velocidad inicial de relajación, ms^{-1}
$1/k_2$	valor asintótico o de equilibrio de $\frac{F_0 - F(t)}{F_0}$