

TEXTURA DE ALIMENTOS



Prof. Ing. Mag. Eduardo S. Castro Montero
1999

REGISTRO PROPIEDAD INTELECTUAL
N° 112249

I.S.B.N. 956.288.485-6

Editor

Eduardo Castro
Avalos N° 5312, Ñuñoa
Diciembre 1999.

**Dedicado a
Patricia Bravo Rivera
quien me hizo renacer
a la vida cuando creía
que estaba agotada.**

Agradecimientos

A todos los memoristas que han trabajado en reología y textura de alimentos.

A mis compañeros de trabajo, a Misael Miranda con quien se apoyó la línea de reología y en especial a Alicia Rodríguez Melis quien ha sido una excelente colaboradora.

No debo olvidar a mis ayudantes de los ramos de la especialidad de la carrera.

Prólogo

Este trabajo está dedicado a atender las necesidades de los que se desempeñan en la industria de alimentos y a los que se están formando en esta área, ya sea en pre-grado y posgrado.

Se ha tratado de presentar la información que ha sido recopilada para poder desarrollar los trabajos en este interesante campo de la ciencia de los alimentos que se han llevado a cabo en nuestros laboratorios, ya sea como proyectos de investigación o como memorias de los alumnos de la carrera de Ingeniería en Alimentos, tan apreciada en lo personal, académico y profesional.

Índice

Textura.....	14
Relación de fatiga versus tiempo a deformación constante.....	14
Cuerpo elástico.....	16
Cuerpo elásticamente retardados.....	17
Cuerpo viscoelástico.....	17
Modelo de Maxwell.....	19
Comportamiento tensión – tiempo.....	20
Diagrama deformación – tiempo.....	22
Modelo de Kelvin.....	23
Comportamiento tensión – deformación.....	24
Comportamiento tensión – tiempo.....	24
Comportamiento deformación – tiempo.....	25
Modelo de Maxwell generalizado.....	26
Modelo de Burgers o Modelo de los cuatro elementos.....	27
Modelo de Kelvin generalizado.....	29
Medidas del comportamiento reológico de los alimentos sólidos.....	30
Métodos estáticos.....	30
Relación tensión – deformación.....	30
Relación tensión – tiempo. Relajación.....	31
Método de los residuos sucesivos.....	32
Estudio de la relación deformación – tiempo.....	33
Texturómetro.....	36
Masticómetro.....	37
Máquina universal de ensayos de material.....	38
Métodos objetivos para medir la textura de alimentos.....	39
Parámetros del perfil de textura.....	40

Perfil de textura.....	40
Modelos que representan el comportamiento de los alimentos con los distintos componentes.....	43
Elementos de rotura.....	43
Elemento elástico y de rotura.....	45
Elemento de Maxwell.....	46
Relajación y creep.....	49
Combinación de elementos.....	51
Modelos continuos.....	56
Análisis matemático del efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de los materiales viscoelásticos.....	58
Modelos lineales y no lineales.....	60
Relación tensión - deformación de un elemento de Maxwell.....	64
Dureza.....	66
Curva de relajación de frutas y vegetales previamente deformados.....	66
Curvas de relajación de alimentos.....	72
Alimentos esponjosos.....	91
Modelación.....	93
Curvas de esfuerzo real versus deformación real.....	101
Ensayos texturales de geles.....	111
Ensayos de relajación y creep.....	114
Esfuerzo y deformación en muestras sometidas a torsión.....	119
Curvas de relajación de geles.....	122
Vida útil.....	125
Mazapán.....	125
Flujo comprimido o flujo por compresión.....	130
Flujo comprimido con lubricación de las placas.....	132
Flujo comprimido sin lubricación de las placas.....	146

Viscosidad elongacional.....	149
Referencias.....	155

Índice de figuras

Figura 1	: Curva típica relajación esfuerzo versus tiempo.....	14
Figura 2	: Curva típica de creep compliance deformación versus tiempo.....	15
Figura 3a	: Curva esfuerzo deformación de sólido Hookeano.....	16
Figura 3b	: Curva esfuerzo versus tiempo para sólido Hookeano.....	16
Figura 3c	: Curva deformación versus tiempo para sólido Hookeano.	16
Figura 4a	: Curva esfuerzo versus deformación para cuerpos elásticamente retardados.....	17
Figura 4b	: Curva esfuerzo versus tiempo de un cuerpo elásticamente retardado.....	17
Figura 4c	: Curva deformación versus tiempo (creep) de un cuerpo elásticamente retardado.....	17
Figura 5	: Curva esfuerzo versus tiempo de un cuerpo viscoelástico.	17
Figura 6	: Curva deformación versus tiempo de un cuerpo viscoelástico.....	18
Figura 7	: Resorte.....	18
Figura 8	: Amortiguador viscoso con fluido newtoniano.....	18
Figura 9	: Representación mecánica del modelo de Maxwell.....	19
Figura 10	: Curva esfuerzo versus tiempo del modelo de Maxwell.....	19
Figura 11	: Curva esfuerzo versus tiempo a deformación constante...	20
Figura 12	: Curva deformación versus tiempo.....	22
Figura 13	: Representación mecánica del modelo de Kelvin.....	23
Figura 14	: Curva esfuerzo versus deformación del modelo de Kelvin.	24
Figura 15	: Curva deformación versus tiempo.....	25
Figura 16	: Número infinito de modelos de Maxwell en paralelo más un resorte en paralelo.....	26

Figura 17	: Representación mecánica del modelo de Burgers.....	27
Figura 18	: Curva deformación versus tiempo del modelo de Burgers.....	28
Figura 19	: Representación mecánica del modelo de Kelvin generalizado.....	29
Figura 20	: Representación del método de los residuos sucesivos.....	33
Figura 21	: Representación de la función $D(t)$ versus tiempo.....	35
Figura 22	: Curva característica del texturómetro.....	36
Figura 23	: Curva característica del masticómetro.....	37
Figura 24	: Curva típica de ensayo de la máquina universal de ensayo de materiales.....	38
Figura 25	: Curva típica de análisis de perfil de textura lograda en texturómetro (Bourne, 1978).....	41
Figura 26	: Curva típica de análisis de perfil de textura lograda en máquina Instron (Bourne, 1978).....	41
Figura 27a	: Símbolo utilizado para la activación del elemento de rotura de tensión (Peleg, 1983).....	43
Figura 27b	: Símbolo utilizado para la activación del elemento de rotura por deformación (Peleg, 1983).....	44
Figura 28	: Relaciones tensión - deformación de un elemento elástico y uno por tensión crítica (σ_c) izquierda y deformación crítica (ϵ_c) derecha (Peleg, 1983).....	45
Figura 29	: El efecto de los dos criterios de ruptura (σ_c y ϵ_c) en el comportamiento de un elemento plástico y de ruptura en serie (Peleg, 1983).....	46
Figura 30	: Relación tensión-deformación de un elemento de Maxwell en serie con un elemento de rotura al ser deformado a dos velocidades de deformación $\dot{\epsilon}_1$ y $\dot{\epsilon}_2$, a σ_c (Peleg, 1983).....	47

Figura 31	:Relación tensión deformación de un elemento de Maxwell en serie con un elemento de rotura al ser deformado a la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_1$ y $\dot{\epsilon}_2$, a ϵ_c (Peleg,1983).....	48
Figura 32	: Relación tensión deformación de un elemento de Maxwell con un elemento de rotura sometido a compresión con dos velocidades de deformación (Peleg, 1983).....	49
Figura 33	: 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 y σ_2 son las tensiones constantes y σ_c es la tensión de rotura, ϵ_c es la deformación de rotura.....	50
Figura 34	: La relación diente 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 actuación σ_c y ϵ_c (Peleg, 1983).....	52
Figura 35	: Esquema de un modelo de tres elementos (Peleg, 1983).	53
Figura 36	: 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).....	54
Figura 37	: Esquema de las posibles respuestas de un modelo de tres elementos con dos criterios de ruptura (ϵ_{c1} y ϵ_{c2}) en pruebas de relajación y creep (Peleg, 1983).....	55
Figura 38	: Esquema de las curvas típicas de creep obtenidas de materiales sólidos a diferentes tensiones (Peleg, 1983)....	57
Figura 39	: Esquema del modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Normand, 1982).....	58

Figura 40	: 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).....	61
Figura 41	: Esquema del modelo utilizado para el estudio (Peleg y Normand, 1982).....	62
Figura 42	: Esquema del modelo utilizado para el estudio (Peleg y Normand, 1982).....	63
Figura 43	: Representación esquemática de las curvas de fuerza de relajación de modelos deformados de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976).....	67
Figura 44	: Relaciones entre fuerza residual (F_{∞}) y deformación de un modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976).....	68
Figura 45	: Representación esquemática del modelo general a dos niveles de deformación (Peleg y Calzada, 1976).....	71
Figura 46	: Curva de relajación de sólidos elásticos, sólidos viscoelásticos y líquidos viscoelásticos (Peleg, 1979).....	73
Figura 47	: Curva de relajación normalizadas de sólidos elásticos (1), sólidos viscoelásticos (2 y 3) y líquidos viscoelásticos (4) (Peleg, 1979).....	75
Figura 48	: Curva de relajación linealizada de sólidos elásticos (1), sólidos viscoelásticos (2 y 3) y líquidos viscoelásticos (4) (Peleg, 1979).....	76
Figura 49	: Curva de relajación normalizada de gel de agar (5%) (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).....	78
Figura 50	: Curva de relajación normalizada de manzana (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).....	79

Figura 51	: Curva de relajación normalizada de queso cheddar (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).....	80
Figura 52	: Curva de relajación normalizada de papa (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).....	81
Figura 53	: Curva de relajación normalizada de pera (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).....	82
Figura 54	: Curva de relajación normalizada de boloña y pan (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).....	83
Figura 55	: Curva típica de linealización de Peleg (Nussinovich y col., 1990).....	84
Figura 56	: Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienas a 28°C , altura inicial 9 mm (Castro, 1995).....	86
Figura 57	: Linealización de Peleg para tres formulaciones de vienas, altura inicial 20 mm (Castro, 1995).....	87
Figura 58	: Esquema de la forma típica de la curva esfuerzo de compresión versus deformación para alimentos esponjosos (Peleg et al., 1989).....	92
Figura 59	: Esquema que muestra los efectos de la magnitud C_1 , C_2 y C_3 en las curvas esfuerzo deformación (Peleg et al., 1989).....	94
Figura 60	: Esquema de la relación esfuerzo deformación de marshmallows en ciclos de compresión descompresión sucesivos (Lee et al., 1983).....	98
Figura 61	: Representación esquemática de las diferencias entre las curvas fuerza versus deformación y las curvas esfuerzo real versus deformación real (Johnson et al., 1980).....	101

Figura 62	: Caracterización mecánica de filete de pescado por medio de la curva esfuerzo real versus deformación real (Johnson et al., 1980).....	102
Figura 63	: Curvas de relajación de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasa sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro et al., 1997).....	104
Figura 64	: Curvas de relajación normalizadas de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro et al., 1997).....	105
Figura 65	: Curvas de relajación linealizadas de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro et al., 1997).....	106
Figura 66	: Modelo tipo ley de la potencia de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro et al., 1997).....	107
Figura 67	: Curvas esfuerzo versus deformación real de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro et al., 1997).....	109
Figura 68	: Curvas de compresión de pasas deshidratadas osmóticamente y pasas sin deshidratado osmótico (humedad 18%) (Castro et al., 1997).....	110
Figura 69	: Representación esquemática de la relación esfuerzo deformación en un ciclo de compresión descompresión (Kaletung et al., 1991).....	112
Figura 70	: 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).....	115

Figura 71	: Esquema de la progresión de un ensayo de creep y la forma en que la deformación asintótica y compliance asintótico fueron calculados por Purkayastha y Peleg (1986).....	117
Figura 72	: Curva de esfuerzo real versus deformación real para la masa rollo a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).....	126
Figura 73	: Curva de esfuerzo real versus deformación real para la masa fruta a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).....	127
Figura 74	: Curva de esfuerzo real versus deformación real para la masa orange a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).....	128
Figura 75	: Curva de esfuerzo real versus deformación real para frutas determinadas a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).....	129
Figura 76	: Esquema de flujo comprimido a velocidad de deformación constante y área constante.....	130
Figura 77	: Esquema de flujo comprimido a volumen constante y área constante.....	131
Figura 78	: Determinación de los parámetros de la ley de la potencia para Separan; n es determinado de la pendiente y m de la ecuación anteriormente vista (Leider, 1974).....	135
Figura 79	: Esquema del procedimiento de cálculo para flujo comprimido a velocidad y área constante (Campanella y Peleg, 1987).....	139
Figura 80	: Curvas típicas de fuerza versus tiempo y $\log F(t)$ versus $1/H(t)$ de mantequilla de maní sometidas a flujo comprimido a velocidad de deformación constante (Campanella y Peleg, 1987).....	140

Figura 81	: Prueba de flujo comprimido, a velocidad de deformación constante. Modelo Ley ₁ de la Potencia para tres formulaciones de pasta de vienas a 28° C, altura inicial 11 mm (Castro, 1995).....	142
Figura 82	: Esquema de procedimiento de cálculo para flujo comprimido a esfuerzo y área constante (Campanella et al., 1987).....	143
Figura 83	: Curvas típicas de $H(t)$ versus tiempo y $\log H(t)$ versus tiempo de mantequilla de maní sometida a flujo comprimido a fuerza constante (Campanella y Peleg, 1987).....	145
Figura 84	: Variación de la altura con el tiempo para fluido con y sin umbral de fluencia, al estar sometido a flujo comprimido con $W=cte$ (Campanella y Peleg, 1987).....	148
Figura 85	: Representación esquemática de la viscosidad elongacional.....	149
Figura 86	: Esquema de la situación en un instante t	150
Figura 87	: Representación de los vectores velocidad y los tensores T_{zz} y T_{rr}	150
Figura 88	: Curva de viscosidad elongacional versus velocidad de deformación biaxial de queso americano a distintas temperaturas, marca nacional (Campanella et al., 1987)...	153
Figura 89	: Viscosidad elongacional en función de la velocidad de deformación biaxial para tres formulaciones de pasta con carne de equino, altura inicial 10 mm (Castro et al., 1993).....	154

Índice de Tablas

Tabla 1	: Métodos subjetivos para medir la textura de alimentos.....	39
Tabla 2	: Dimensiones de los parámetros del perfil de textura.....	40

Textura

La textura de los alimentos tiene una importancia fundamental en la producción y aceptación del producto por el consumidor.

La primera sensación de textura del consumidor lo lleva a aceptar el alimento y las sensaciones finales al masticarlo lo llevan a ingerirlo, porque el alimento ha respondido a lo que el consumidor esperaba de él.

En la primera parte se presentarán algunos conceptos básicos que en una primera etapa podrían ser aceptados y a medida que se avanza en el texto van a ser entendidos en su globalidad.

Para ello se empezará con la relación de fatiga versus tiempo.

Relación de fatiga versus tiempo a deformación constante

Relajación (relaxation): en estas medidas el material es sometido a deformación súbita ϵ_0 , que se mantiene constante.

Muchos materiales dan resultados, como los indicados en la figura:

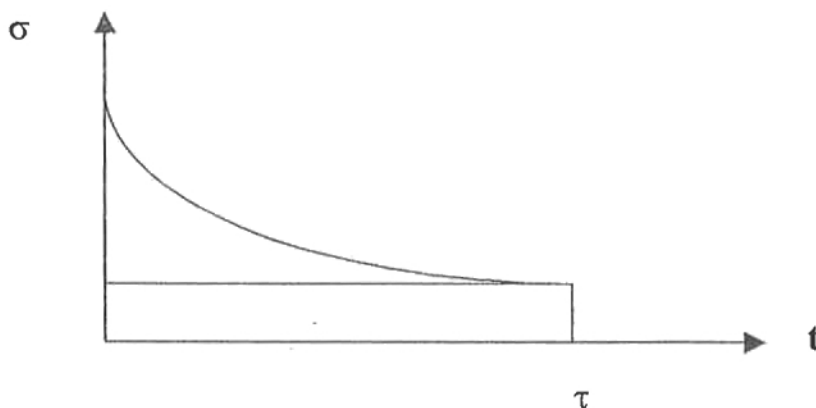


Fig. 1: Curva típica de relajación esfuerzo versus tiempo.

Tiempo de relajación (τ) es el punto en que la fatiga ha caído a σ/e (e es la base del logaritmo natural) o a un 36,7% del valor inicial. Cuando la deformación se retira al tiempo τ , la fatiga vuelve a cero:

J: Creep Compliance : es la relación de deformación en función del tiempo con el cuerpo sometido a fatiga constante, o sea, el material es sometido a una aplicación instantánea de una carga constante o fatiga y la deformación se mide en función del tiempo.

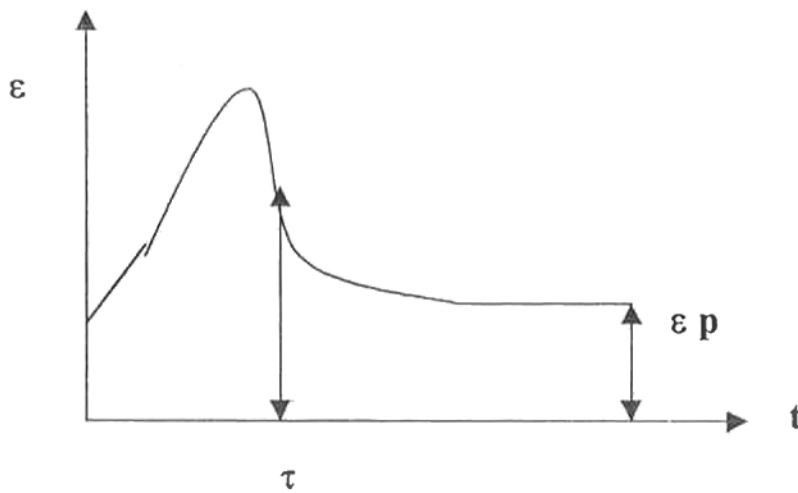


Fig. 2: Curva típica de creep compliance deformación versus tiempo.

Al aplicar la carga al tiempo cero se produce una deformación ϵ_0 que aumenta con el tiempo. Al sacar la carga al tiempo τ la deformación inmediatamente disminuye, parte vertical de la curva al tiempo τ y continúa disminuyendo con el tiempo. En muchos materiales ϵ no llega a cero y se tiene una deformación permanente (Fig. 2).

La razón de la deformación a la fuerza aplicada es una función del tiempo y se le denomina "J" Creep Compliance.

¿Qué sucede con los diferentes tipos de cuerpos?

Se sabe que en un extremo está el líquido ideal y en el otro el cuerpo elástico o sólido ideal. Entremedio están todos los cuerpos que conocemos.

Cuerpo elástico

Es el sólido ideal o Hookeano y es representado mecánicamente por un resorte.

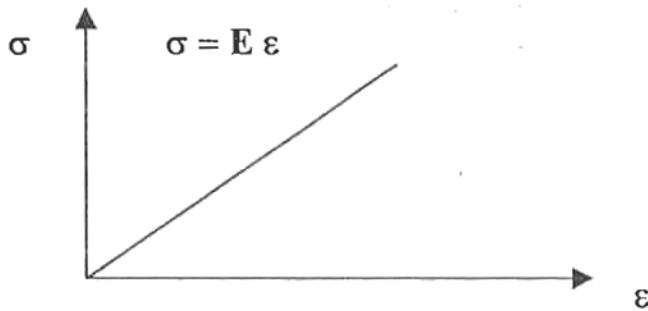


Fig. 3a: Curva esfuerzo deformación de sólido Hookeano.

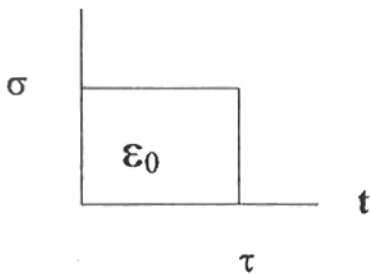


Fig. 3b: Curva σ vs. t
para sólido
Hookeano.

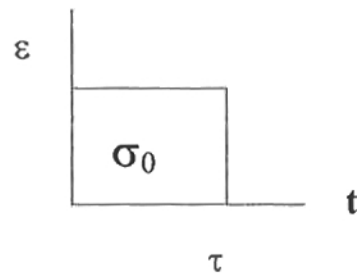


Fig. 3c: Curva ε vs. t
para sólido
Hookeano.

Cuerpos elásticamente retardados

Son los cuerpos que se comportan como los mostrados en las figuras 4a, 4b y 4c.

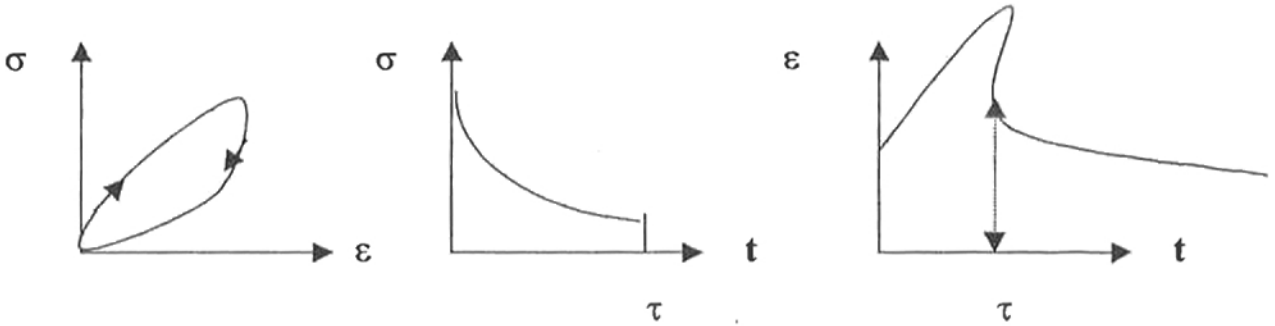


Fig. 4a: Curva σ vs. ϵ .

Fig.4b: Curva σ vs. t
de un cuerpo
elásticamente
retardado

Fig. 4c: Curva ϵ vs. t
(creep) de un cuerpo
elásticamente
retardado

Cuerpo viscoelástico

Significa componente viscoso y componente elástico. El componente elástico puede ser parcialmente retardado. El cuerpo viscoelástico puede fluir lentamente y en forma irreversible bajo la acción de una fuerza pequeña. Al ser sometido a fuerzas grandes el componente elástico llega a ser aparente. La curva de "relajación" (relaxation) es de la forma indicada en la figura 5 y la curva tiene tendencia a acercarse al eje tiempo.

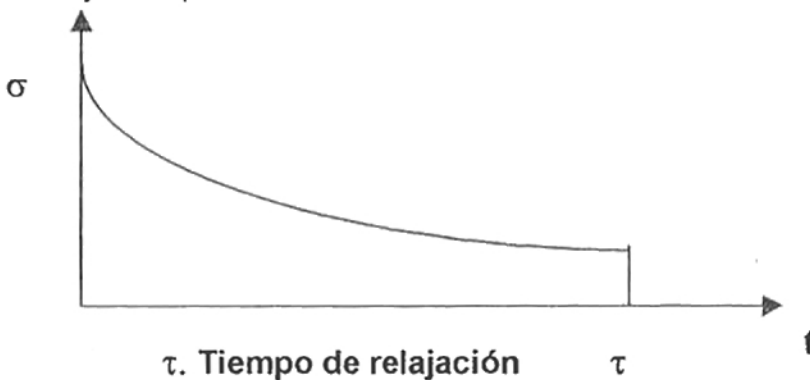


Fig.5: Curva esfuerzo vs. tiempo de un cuerpo viscoelástico.

La curva de deformación vs. tiempo indica que la deformación aumenta tanto como la fuerza aplicada (Fig. 6).

La magnitud de la deformación permanente en el cuerpo aumenta con la fatiga aplicada y con el tiempo de aplicación.

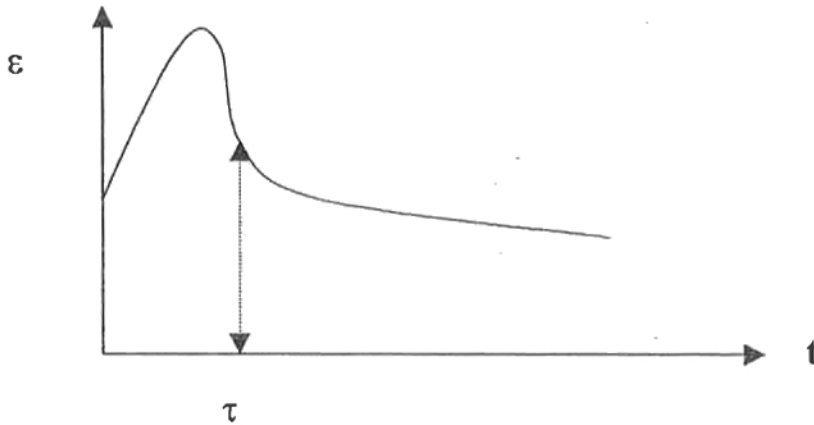


Fig. 6: Curva deformación vs. tiempo de un cuerpo viscoelástico.

Representación mecánica

Como ya se había dicho, en un extremo de los cuerpos está el sólido ideal o Hookeano, que es representado mecánicamente por un resorte (Fig. 7), y en el otro extremo está el líquido Newtoniano (líquido ideal) representado mecánicamente por un amortiguador viscoso (Fig. 8). Entre ellos están los cuerpos viscoelásticos y su comportamiento puede ser representado por combinaciones de estos elementos.



Fig. 7: Resorte
"elemento elástico ideal"
E: constante elástica

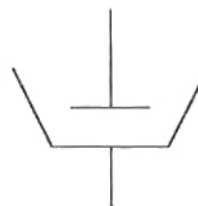


Fig.8: Amortiguador viscoso
con fluido newtoniano
"elemento viscoso ideal"
 μ : viscosidad

Modelo de Maxwell

Representa el comportamiento de los materiales con un resorte y un amortiguador en serie (Fig. 9).

La deformación total del sistema, para un tiempo t es la suma de las deformaciones de los dos elementos $\varepsilon(t) = \varepsilon_{\mu} + \varepsilon_E$ y la tensión o fatiga es

$$\sigma = \sigma_{\mu} = \sigma_E.$$

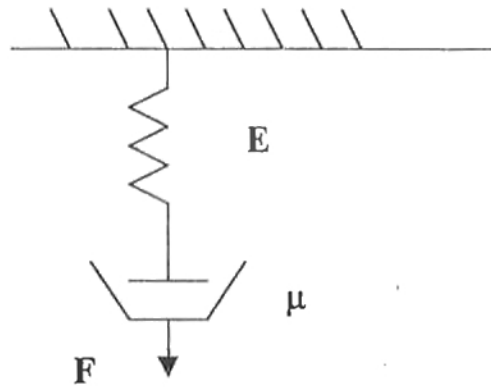


Fig.9: Representación mecánica del modelo de Maxwell.

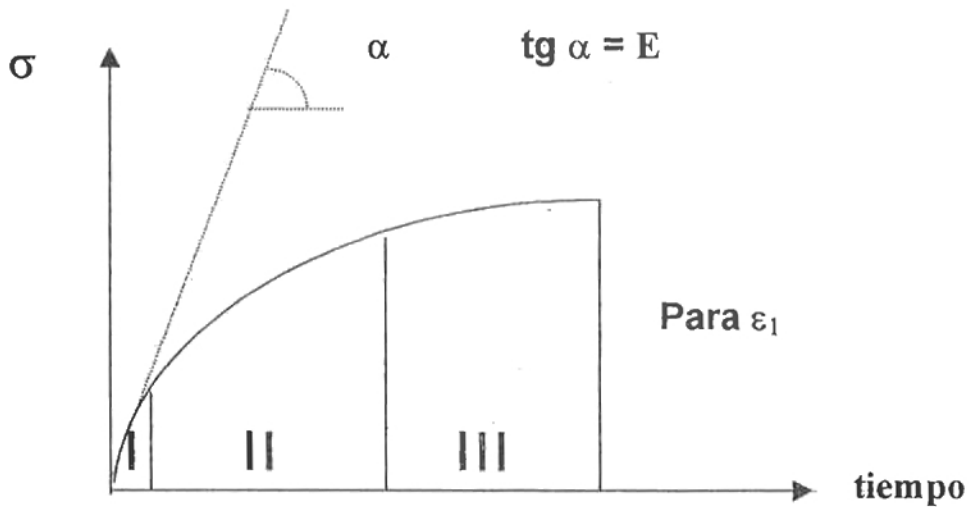


Fig.10: Curva esfuerzo versus tiempo del modelo de Maxwell.

El diagrama de la figura 10 indica que:

Inicialmente toda la fuerza que recibe el elemento sometido a ensayo, la utiliza el componente elástico (el resorte se estira) y la primera zona de la curva corresponde a la ley de Hooke (zona I).

Al llegar a valores mayores intervienen ambos elementos, el elemento viscoso disminuye la deformación correspondiente a la constante E del resorte hasta que se alcanza su máxima elongación (zona II). A partir de este valor de la tensión, toda es absorbida por el elemento viscoso y se produce en el sistema un flujo newtoniano, la pendiente de la curva disminuye hasta anularse (zona III).

Comportamiento tensión-tiempo

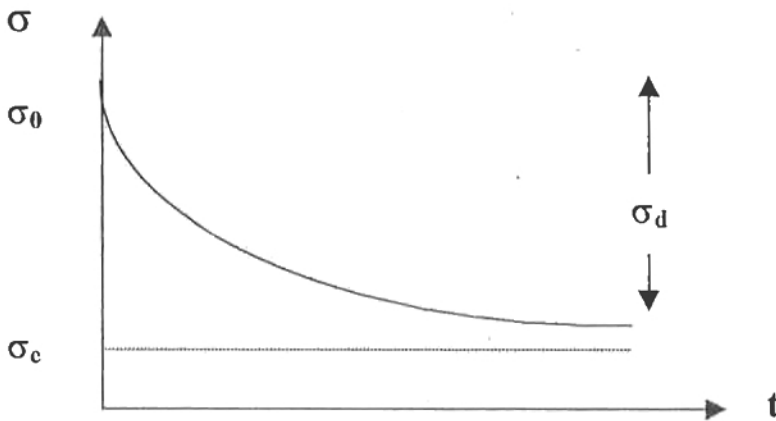


Fig.11: Curva esfuerzo versus tiempo a deformación constante.

Si el sistema se somete a una deformación constante (ϵ_0) la tensión inicial (σ_0) disminuye con el tiempo (Fig.11). Este fenómeno se llama relajación y la variación de él en función del tiempo se expresa por:

$$\sigma(t) = \sigma_d \cdot e^{-t/\tau_{rel}} + \sigma_e$$

con $\sigma_d = \sigma_0 - \sigma_e$

donde σ_d es la tensión de decaimiento

σ_e es la tensión residual o de equilibrio luego de un tiempo $t = \infty$

τ_{rel} es el tiempo de relajación.

Esto representa la rapidez con que el cuerpo se relaja.

$$\text{Si } \sigma_e = 0 \Rightarrow \sigma(t) = \sigma_d \cdot e^{-t/\tau_{rel}}$$

Esto indica relajación total, τ_{rel} toma el valor del tiempo que el sistema emplea para relajar la tensión inicial σ_0 a un valor σ_0/e , o sea, a un 36,8% de la misma.

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

$$E(t) = E_d \cdot e^{-t/\tau_{rel}} + E_e$$

Esta ecuación indica que aún a tiempos muy largos algo de tensión 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, para el estudio de características viscoelásticas de los materiales.

Diagrama deformación – tiempo

En la figura 12 se presenta la respuesta del modelo frente a una acción de carga y descarga (σ constante). Al ser aplicada la tensión al componente elástico se deforma instantáneamente hasta alcanzar el valor que fija su módulo E y a partir de este momento la deformación es regida por el componente elástico.

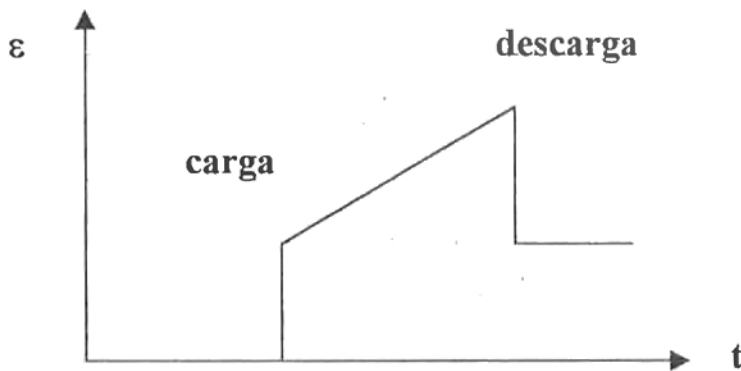


Fig.12: Curva deformación versus tiempo.

Este comportamiento no se asemeja a la respuesta observada experimentalmente en los materiales viscoelásticos que sometidos a una tensión constante presentan una deformación elástica retardada.

Este método no es útil para estudiar viscoelasticidad por medio de la aplicación de una tensión constante.

Modelo de Kelvin

En este modelo el comportamiento del material es representado por un resorte en paralelo con un amortiguador viscoso en paralelo (Fig.13).

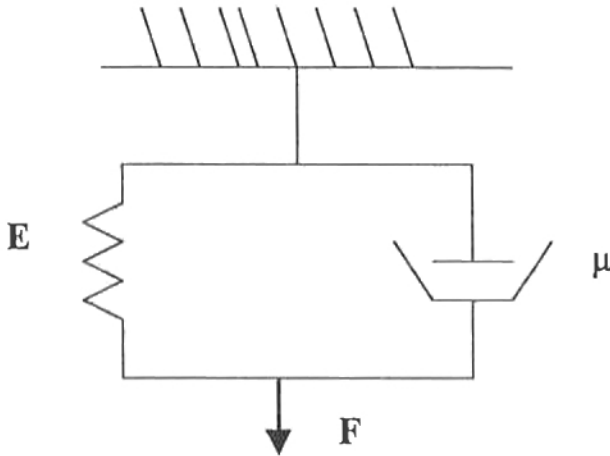


Fig.13: Representación mecánica del modelo de Kelvin.

La tensión total σ se reparte entre ambos elementos: $\sigma = \sigma_E + \sigma_\mu$

La deformación es igual a la deformación del resorte y a la del amortiguador

$$\varepsilon = \varepsilon_E = \varepsilon_\mu$$

Comportamiento tensión – deformación

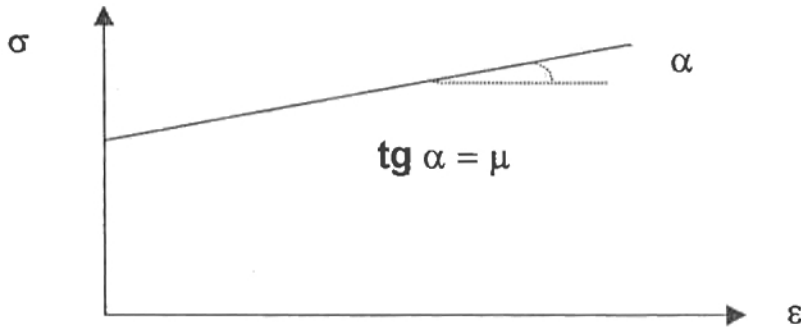


Fig.14: Curva esfuerzo versus deformación del modelo de Kelvin.

Al analizar el diagrama de la figura 14 se obtiene:

El sistema alcanza instantáneamente el valor de tensión correspondiente al componente viscoso y mientras éste permanece constante la tensión sobre el componente elástico aumenta en forma lineal.

Comportamiento tensión – tiempo

Al someter un material viscoelástico a una deformación constante, su tensión decae paulatinamente dando origen a relajación.

De acuerdo al modelo de Kelvin al aplicar una deformación constante su tensión es constante, por lo tanto este modelo no explica satisfactoriamente el fenómeno de relajación.

Comportamiento deformación – tiempo

En la figura 15 se representa la situación.

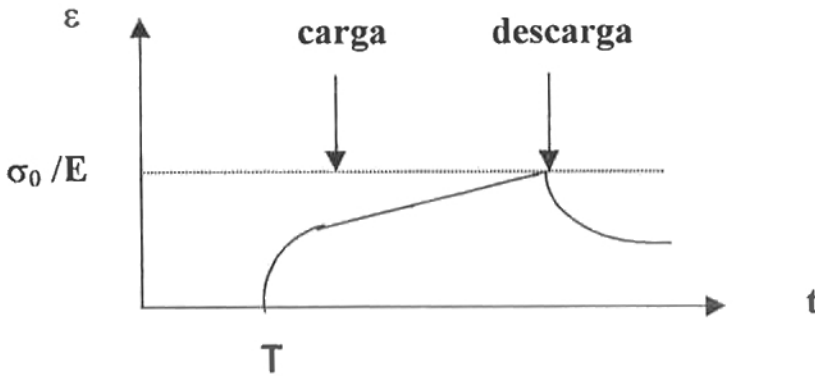


Fig.15: Curva deformación versus tiempo.

$$\epsilon = \sigma_0 / E (1 - e^{-t / \tau_{ret}})$$

σ₀ es la tensión constante y τ_{ret} es el tiempo de retardación y representa el tiempo empleado por el sistema para deformarse una fracción (1 – 1/e) de la deformación total en el equilibrio, o sea, un 63% de la misma.

Al llegar el momento de retiro de la fuerza aplicada, el sistema tiende a recuperar su estado inicial a partir de la deformación alcanzada ε_x.

Este comportamiento está cumpliendo el modelo: $\epsilon(t) = \epsilon_x \cdot e^{-t / \tau_{ret}}$ que está indicando que el sistema alcanzará su estado inicial en un tiempo infinito.

Esta técnica de estudio aplicada es "creep compliance test".

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.

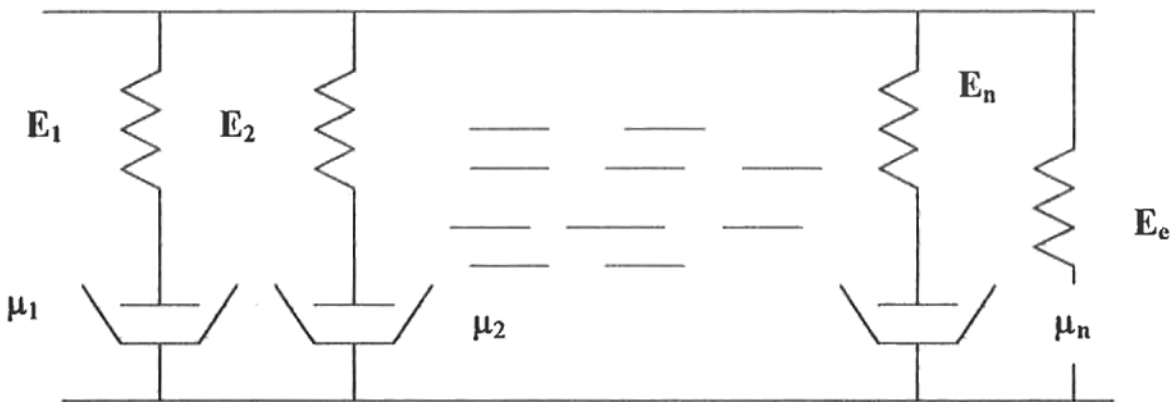


Fig.16: Número infinito de modelos de Maxwell en paralelo más un resorte en paralelo.

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.16).

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

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

$$\sigma(t) = \epsilon_0 (E_{d_1} e^{-t/\tau_1} + E_{d_2} e^{-t/\tau_2} + \dots + E_e)$$

en que:

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ son los tiempos de relajación de cada elemento de Maxwell.

E_e módulo de equilibrio.

Modelo de Burgers o Modelo de los cuatro elementos

En otros materiales viscoelásticos sucede que al aplicar una tensión constante se produce una deformación elástica instantánea seguida de una elástica retardada hasta que se establece un flujo newtoniano en el sistema (Fig.17).

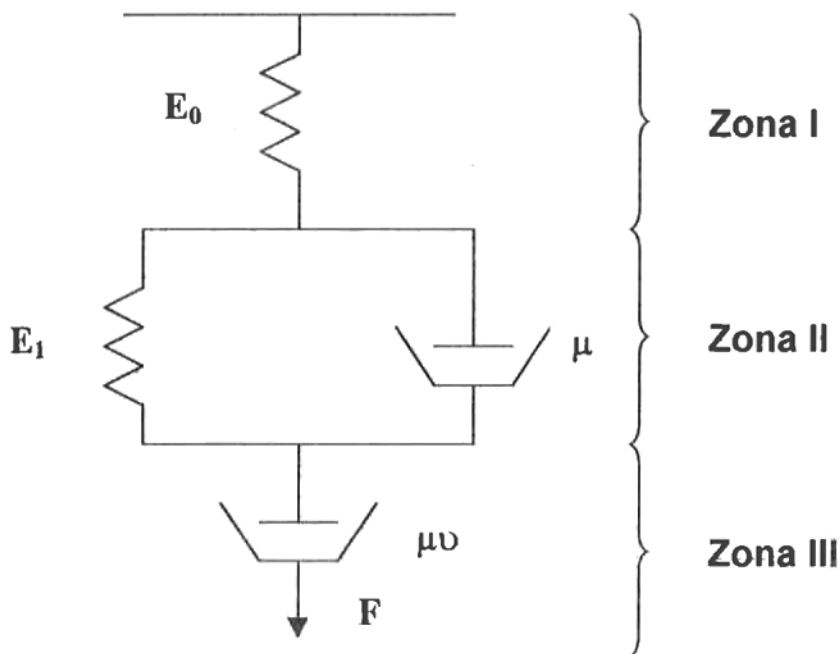


Fig.17: Representación mecánica del modelo de Burgers.

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

La tensión es la misma en cada zona: $\sigma = \sigma_I = \sigma_{II} = \sigma_{III}$ y cumplen:

$$\sigma_I = E_0 \varepsilon_I$$

$$\sigma_{II} = E_1 \varepsilon_{II} + \mu \dot{\varepsilon}_{II} \text{ corresponde a deformación elástica retardada}$$

$$\sigma_{III} = \mu_v \dot{\varepsilon}_{II} \text{ corresponde a flujo newtoniano}$$

Al aplicar una tensión constante se tiene el comportamiento siguiente:

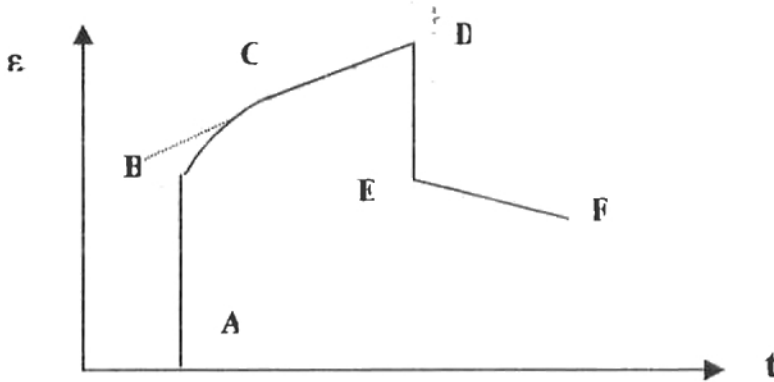


Fig.18: Curva deformación versus tiempo del modelo de Burgers.

Al aplicar 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. Si se produce la descarga, el componente elástico produce la recuperación instantánea DE, y la recuperación retardada EF se debe a la acción del elemento Kelvin zona II.

Este modelo permite describir la relajación de los materiales viscoelásticos, es más complicado que el modelo de Maxwell generalizado y los investigadores prefieren ocupar este último.

Modelo de Kelvin generalizado

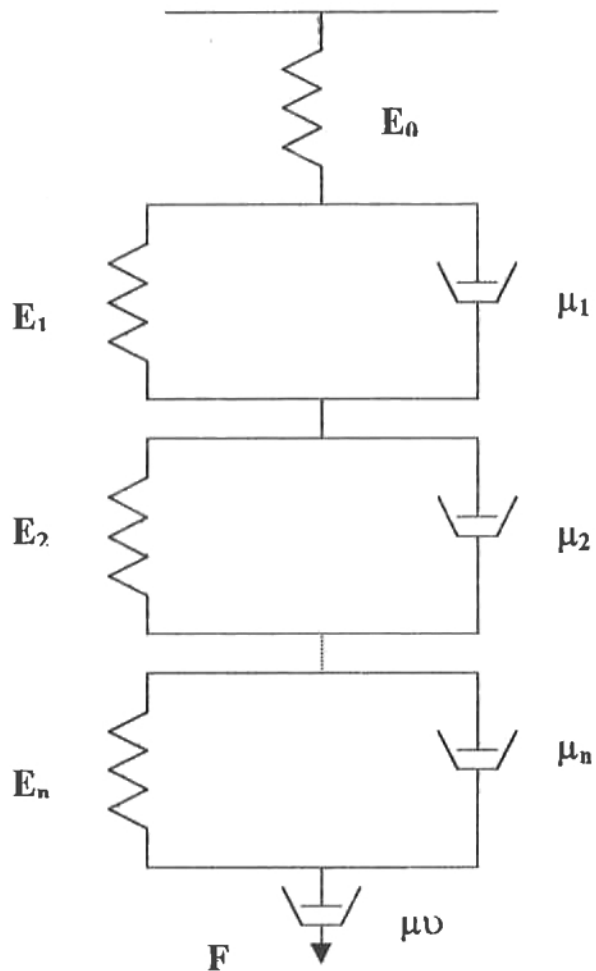


Fig.19: Representación mecánica del modelo de Kelvin generalizado.

Tensión constante

El resorte representa la elasticidad instantánea, los "n" elementos de Kelvin rigen la deformación retardada y el amortiguador μ_v da cuenta del flujo newtoniano final (Fig.19).

La relación deformación tiempo para un elemento sometido a tensión constante σ_0 es:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[1/E_0 + 1/E_{r_1} (1 - e^{-t/\tau_1}) + 1/E_{r_2} (1 - e^{-t/\tau_2}) + \dots + 1/E_{r_n} (1 - e^{-t/\tau_n}) + t/\mu_0 \right]$$

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ son los tiempos de relajación de los diferentes elementos de Kelvin.

Medidas del comportamiento reológico de los alimentos sólidos

I. Métodos estáticos

La tensión se aplica en forma continua y sin variaciones, o alcanza un valor determinado instantáneamente.

Permiten obtener:

- i) relaciones tensión - deformación
- ii) relaciones tensión - tiempo
- iii) relaciones deformación - tiempo

i) Relación tensión - deformación

Se deforma la muestra a velocidad constante y se registra la fuerza que provoca esa deformación.

La información que entrega está estrechamente relacionada con la resistencia de los materiales.

Los ensayos pueden ser:

- compresión uniaxial
- tracción
- cizalla
- flexión y compresión hidroestática (inmersión)

Con sus resultados pueden calcularse:

- módulo de elasticidad E
- módulo de cizalla $G(t)$
- módulo de compresibilidad K

y lo más importante:

- estudio de curvas registradas
- análisis comparativo de los comportamientos reológicos que ellos representan.

Hay que realizar ensayos exploratorios para conocer la influencia de la velocidad de aplicación de la deformación sobre la respuesta del material de ensayo.

En general, cuando se aplican deformaciones pequeñas a los materiales reales, la influencia de la velocidad de deformación es nula.

Conocimiento de la magnitud de la tensión para la que la respuesta deja de ser lineal es fundamental, expresa el límite en que el comportamiento fuerza-deformación depende de la velocidad de deformación (viscoelasticidad no lineal).

Las experiencias se realizan a velocidades de deformación constantes en forma usual.

El equipo más utilizado es la máquina Instron Universal.

ii) Relación tensión – tiempo. RELAJACIÓN

Al someter un material viscoelástico a una deformación y ésta se mantiene constante, la tensión soportada disminuye en función del tiempo. Esto es la RELAJACIÓN y es la base de uno de los ensayos más utilizados para caracterizar el comportamiento reológico de los sólidos.

De la observación directa se puede extraer conclusiones cualitativas de las respuestas relativas de distintos materiales en estudio. 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 o simple y calculan las constantes reológicas que lo definen.

Modelo de Maxwell generalizado para la "RELAJACIÓN"

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 (E_1 e^{-t/\tau_{rel1}} + E_1 e^{-t/\tau_{rel2}} + \dots + E_1 e^{-t/\tau_{reln}} + Ee)$$

Uno de los métodos de análisis de los datos es el siguiente:

El primer paso es representar gráficamente el logaritmo de los valores de la tensión en función del tiempo.

Si se obtiene una "recta es MAXWELLIANO SIMPLE" y el tiempo de relajación se puede determinar de la "pendiente".

Si se ajustan a sistemas con varios elementos de Maxwell en paralelo se tienen varios tiempos de relajación.

En este caso se puede estimar un tiempo de relajación medio.

Uno de los métodos se basa en " el espectro de tiempos de relajación sigue una curva de distribución normal, con el tiempo en base logarítmica".

Método de los residuos sucesivos

Se representa gráficamente el logaritmo de la tensión en función del tiempo, la parte recta de la curva para tiempos largos se representa por una ecuación cuya pendiente da el tiempo de relajación y de la intersección de la recta con el eje se obtiene el coeficiente de la primera exponencial.

En segundo lugar se dibujan las diferencias entre la curva original y la primera recta obtenida, para los tiempos correspondientes y se calculan las constantes en forma análoga al anterior (Figura 20).

Este procedimiento se repite hasta que la curva original pueda ser representada por un número suficiente de términos exponenciales.

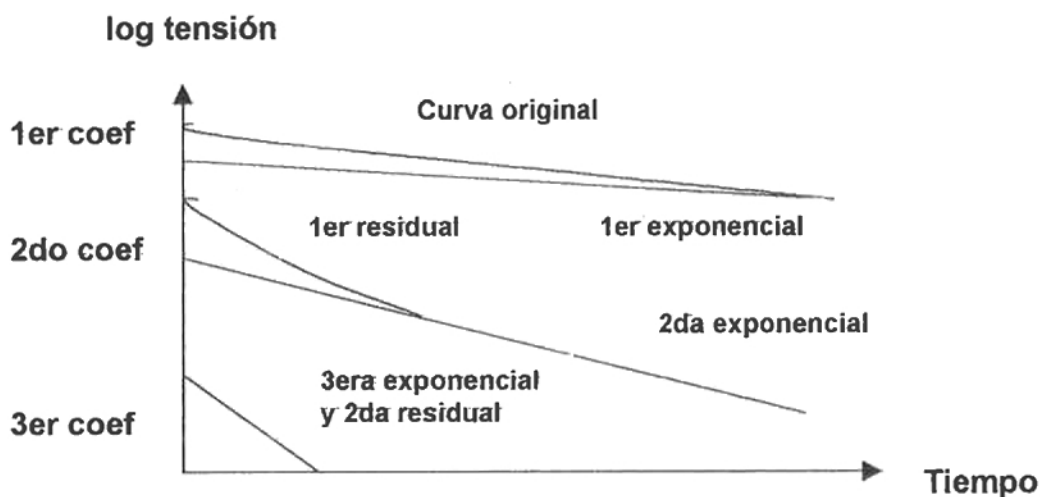


Fig.20: Representación del método de los residuos sucesivos.

iii) Estudio de la relación deformación – tiempo

Se someten a tensión constante y se registra su deformación en función del tiempo.

El modelo de Burgers representa bastante bien esta situación con la ecuación siguiente:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 / E_0 + \sigma_0 / E_r \left(1 - e^{-t / \tau_{ret}} \right) + \sigma_0 t / \mu_v$$

Cuando se presentan varios tiempos de retardación es mejor representar la situación con el modelo de Kelvin generalizado.

Comúnmente se expresan en términos de la función $D(t)$ que es la inversa del módulo de elasticidad y representa la relación instantánea deformación – tensión (compliance).

$$D(t) = D_0 + D_r \left(1 - e^{-t / \tau_{ret}} \right) + t / \mu_v$$

donde:

$D_0 = 1 / E_0$ "compliance" inicial

$D_r = 1 / E_r$ "compliance" retardado

Al aplicar fuerzas de cizalla o de compresión volumétrica se definen las funciones J(t) y B(t) inversas de los módulos G(t) y K(t).

En los ensayos se tiene curvas características del tipo siguiente:

$D_0 = 1/E_0$ corresponde a zona elástica instantánea AB (Fig.21)

$D_r (1 - e^{-t/\tau_{ret}})$ corresponde a elasticidad retardada BC (Fig.21)

Si hay varios tiempos de retardación la expresión es:

$$\sum_i D_{r_i} (1 - e^{-t/\tau_{ret_i}}) = \varepsilon(t) / \sigma_0$$

El cálculo se realiza con el método de Inokuchi.

Si se define: $Q = \sum_i D_{r_i} - \varepsilon(t) / \sigma_0 = \sum_i D_{r_i} e^{-t/\tau_{ret_i}}$ corresponde a la extrapolación lineal de la curva en P y la misma curva para todo el tiempo.

Si se dibuja Ln Q vs. tiempo se logra una curva con una porción lineal para valores de tiempos largos, su ecuación corresponde al primer término exponencial de la ecuación:

$$\sum_i D_{r_i} (1 - e^{-t/\tau_{ret_i}}) = \varepsilon(t) / \sigma_0$$

y de su pendiente se obtiene el primer tiempo de retardación (τ_{ret_1}) y su ordenada al origen es D_{r_1} . Con estos parámetros se calculan los valores de la primera ecuación y se comprueban que coincidan con los experimentales, si no es así, existen más términos exponenciales.

Se calculan a partir de gráfico Ln $[Q - D_{r_i} (e^{-t/\tau_{ret_i}})]$ vs. tiempo y de su porción lineal se calcula de modo análogo el segundo término exponencial y si es necesario se sigue aplicando el procedimiento descrito.

El tercer término de: $D(t) = D_0 + D_r (1 - e^{-t / \tau_{ret}}) + t / \mu_v$ corresponde a la zona de flujo newtoniano CP.

Al sacar la carga se produce la "curva de recuperación" PEF. Existe una "recuperación" instantánea PE = AB seguida de una "retarda" EF (Fig.21).

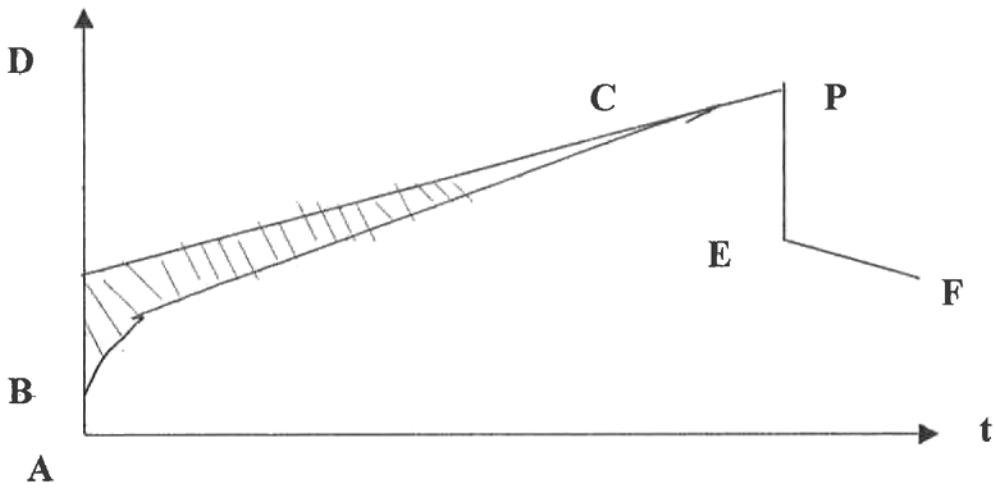


Fig.21: Representación de $D(t)$ en función del tiempo.

Texturómetro

La forma de la curva fuerza versus tiempo en este tipo de aparato es la que se muestra a continuación (Fig.22).

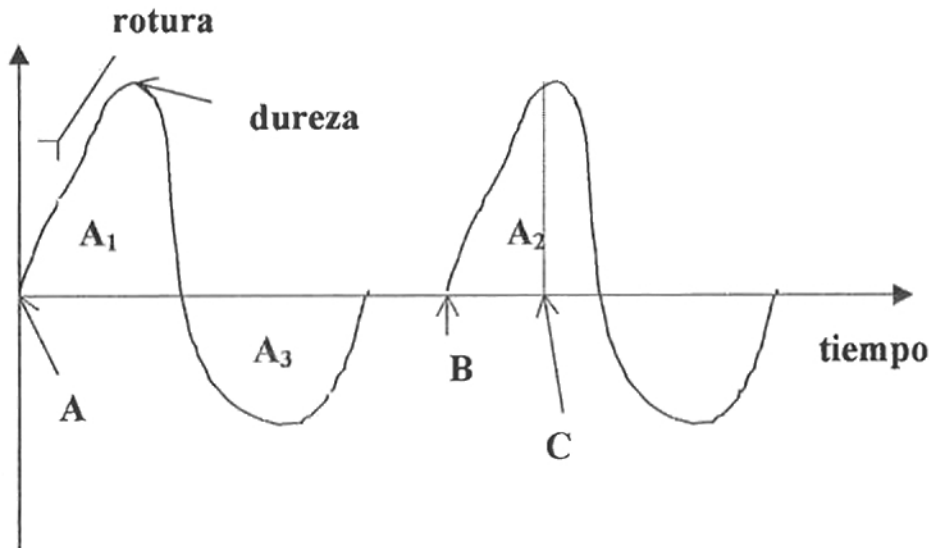


Fig. 22: Curva característica del texturómetro.

Cuando parte la aplicación de la fuerza hasta alcanzar el máximo que es la fuerza de ruptura (dureza o hardness) puede que se produzca una acomodación del material a la fuerza aplicada, notándose un salto en la curva, lo que se denomina rotura (fracturability).

La fuerza empieza a bajar y puede que se produzca el área bajo el eje tiempo (A_3) y al empezar el ciclo de nuevo se repitan las curvas ya vistas.

En este tipo de ensayo se definen:

$$\text{Cohesividad (Cohesiveness)} = A_2/A_1$$

$$\text{Elasticidad (Springiness, elasticity)} = B-C$$

$$\text{Chiclosidad (Chewiness)} = \text{Dureza} \times \text{Cohesividad} \times \text{Elasticidad}$$

Las curvas en estos ensayos salen redondeadas en sus valores máximos debido a que el aparato tiene una biela para cambiar de recorrido.

Masticómetro

Es un aparato diseñado para representar nuestra acción de masticar los alimentos.

Se representa una curva característica del masticómetro en la figura 23.

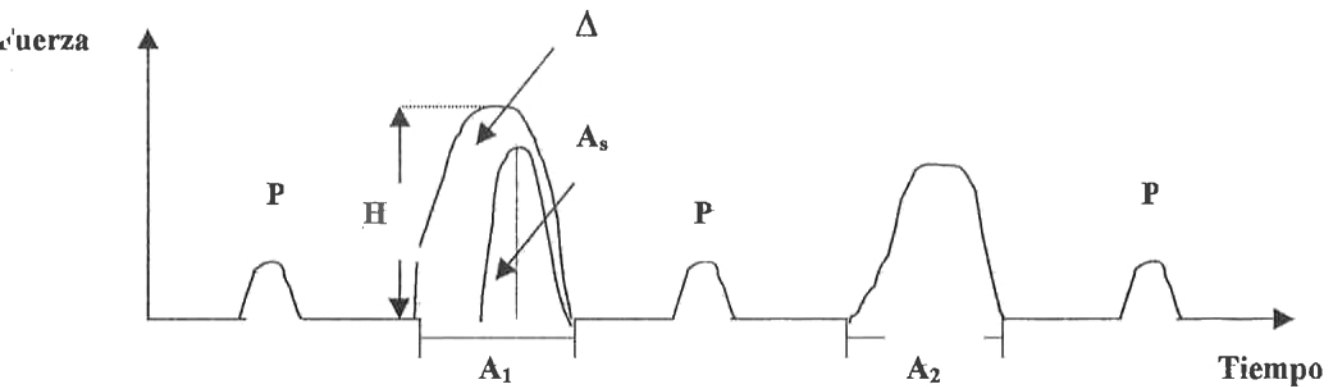


Fig.23: Curva característica del masticómetro.

Los parámetros más importantes son los siguientes:

P : posición máxima del punzón

H: altura del primer pico

A₁: área total del primer pico

A₂: área total del segundo pico

A_s: área de descomposición del primer movimiento

$$\Delta = A_1 - A_s$$

Δ / A_s = Índice de masticabilidad (crushability index)

Máquina universal de ensayos de material

La máquina universal de ensayos de material tiene motor eléctrico que cambia de sentido de giro al realizar los ensayos y por eso las curvas tienen puntas como los que se muestran en la figura 24.

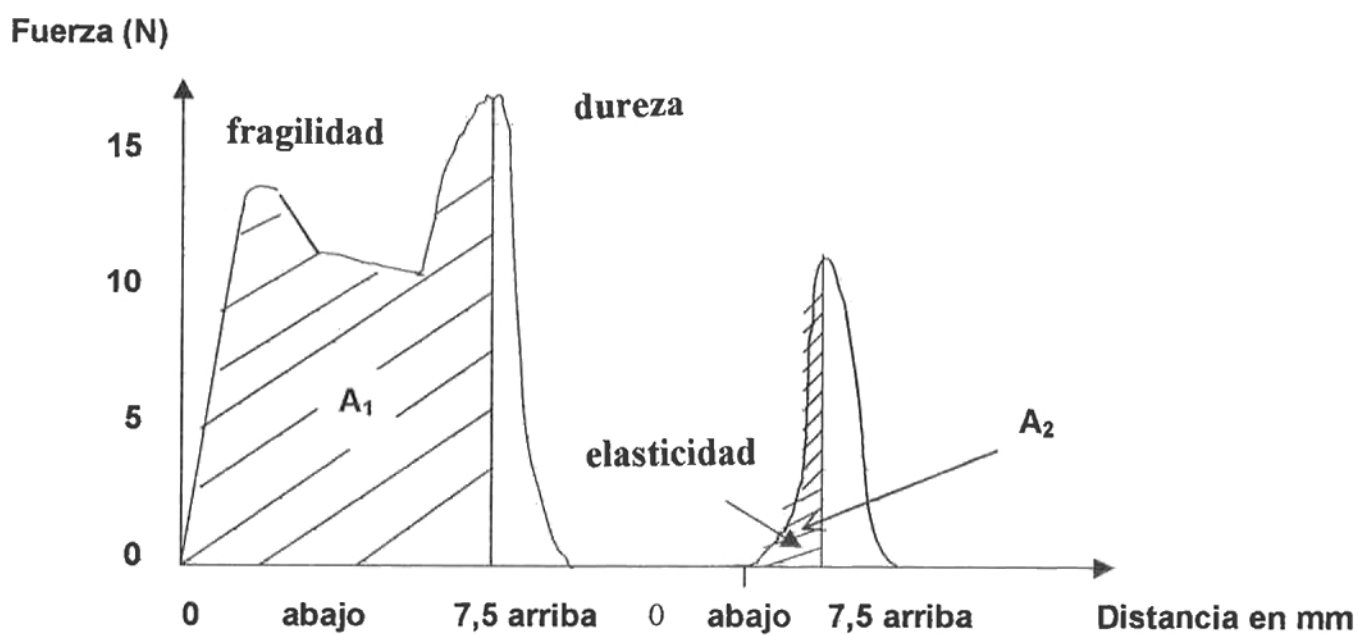


Fig.24: Curva típica de ensayo de la máquina universal de ensayo de materiales.

Métodos objetivos para medir la textura de alimentos

A continuación se presentan algunos métodos objetivos para medir la textura de los alimentos.

Tabla 1: Métodos objetivos para medir textura de alimentos.

Método	Variable medida	Dimensiones	Ejemplos
Fuerza	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	
Penetración (Puncture)	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	Magness – Taylor
Extrusión	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	Shear press, tenderometer
Cizalla (Shear)	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	Warner – Bretzler
Molienda (Crushing)	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	
Tensión (Tensile)	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	
Momento (Torque)	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	Viscosímetro rotatorio
Quiebre brusco (Snapping)	Fuerza (F)	$m \cdot l \cdot t^{-2}$	Bailey Skortometer
Distancia	Longitud	l	Penetrómetro
	Área	l^2	Consistómetro
	Volumen	l^3	Volumen pan
Tiempo	Tiempo (T)	t	Viscosímetro de Ostwald
Energía	Trabajo (FxD)	$m \cdot l^2 \cdot t^{-2}$	
Razón	F o D o T medida doble	Sin dimensión	Gravedad específica
Variable múltiple (Multiple variable)	Cualquiera	No claro	Durometer
Análisis químico (Chemical analysis)	Concentración	Sin dimensión, (%)	Sólidos insolubles en alcohol
Misceláneo	Cualquiera	Cualquiera	Densidad óptica, molienda, sonidos

Parámetros del perfil de textura

A continuación se presentan los parámetros más importantes del perfil de textura y sus dimensiones.

Tabla 2: Dimensiones de los parámetros del perfil de textura.

Parámetro mecánico	Variable medida	Dimensiones de la variable
Dureza (Hardness)	Fuerza	$m \cdot l \cdot t^{-2}$
Cohesividad (Cohesiveness)	Razón	Sin dimensión
Elasticidad (Elasticity)	Distancia	l
Pegajosidad (Adhesiveness)	Trabajo	$m \cdot l^2 \cdot t^{-2}$
Fragilidad (Brittleness)	Fuerza	$m \cdot l \cdot t^{-2}$
Chiclosidad (Chewiness)	Trabajo	$m \cdot l^2 \cdot t^{-2}$
Gomosidad (Gumminess)	Fuerza	$m \cdot l \cdot t^{-2}$
Viscosidad (Viscosity) (fluidos)	Flujo	$l^3 \cdot t^{-1}$

Perfil de textura

Bourne (1978) por su parte plantea que existen tres tipos de medidas instrumentales para valorar la textura:

- Medidas fundamentales son las que valoran propiedades tales como esfuerzo de ruptura, relación de Poisson, módulo de Young, módulo de cizalla y otros.
- Medidas empíricas cubren una serie de ensayos empíricos tales como penetración, cizalla, extrusión y otros. Estos ensayos empíricos se correlacionan bastante bien con la evaluación sensorial de textura de los alimentos.

Medidas imitativas son las logradas con instrumentos que imitan la acción de la boca al masticar.

El perfil de textura está basado en el ensayo fuerza vs. tiempo en que se logran curvas como las presentadas en las figuras 25 y 26.

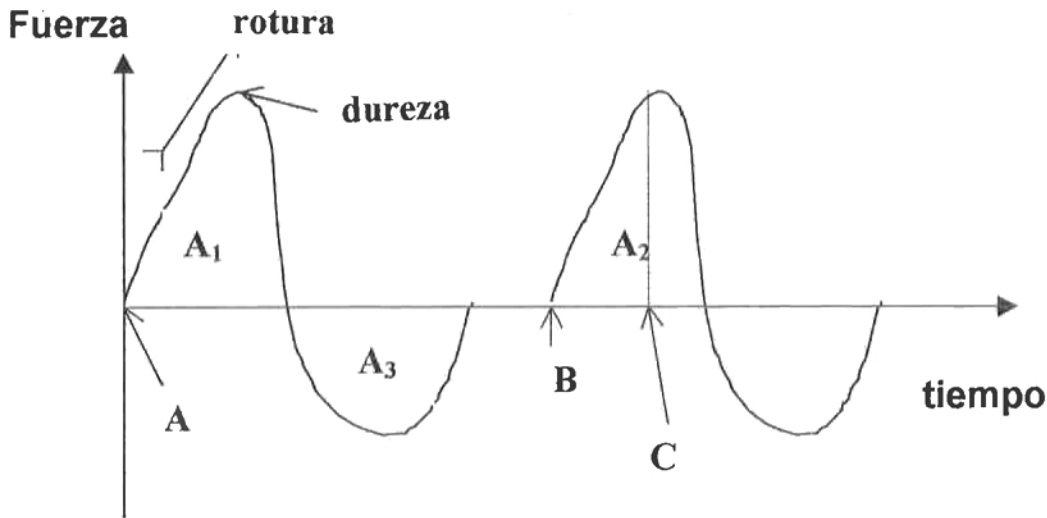


Fig.25: Curva típica de análisis de perfil de textura lograda en texturómetro (Bourne, 1978).

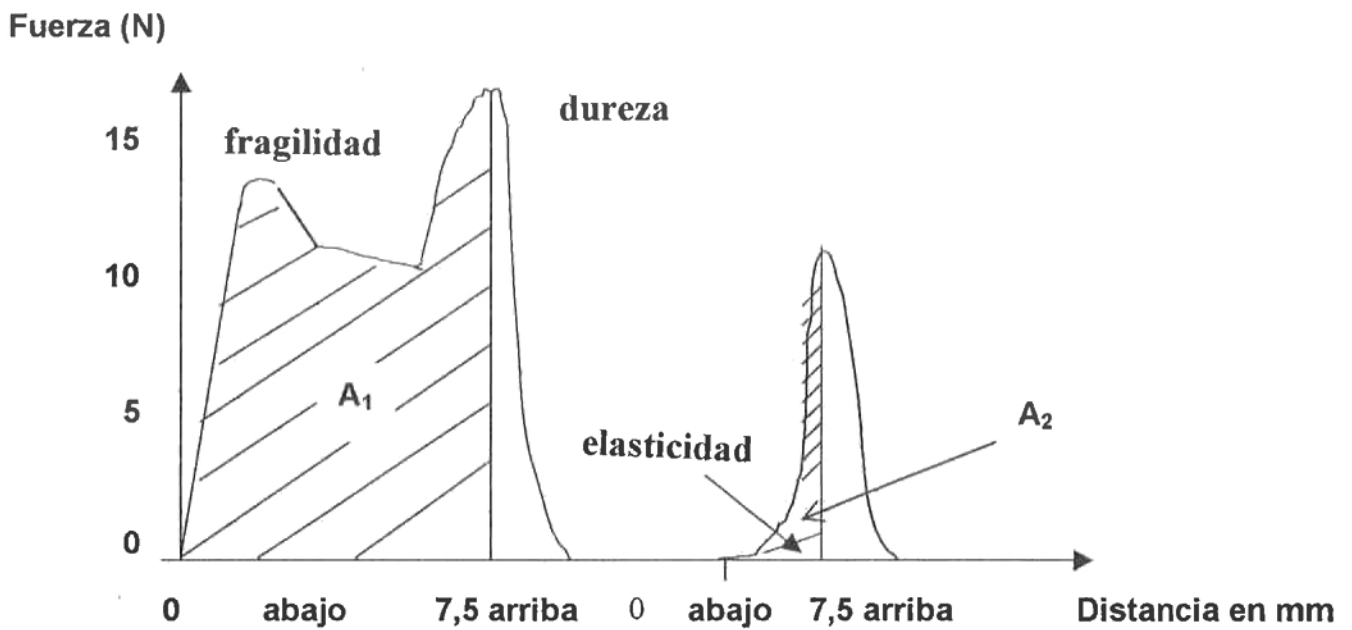


Fig.26: Curva típica de análisis de perfil de textura lograda en máquina Instron (Bourne, 1978).

Del análisis de las curvas de las figuras se logran siete parámetros texturales, de los cuales cinco se obtienen de medidas y dos se logran por medio de cálculo.

- Fracturabilidad (fracturability, antes llamado brittleness) es la fuerza en el primer quiebre significativo de la curva.
- Dureza (hardness) es definida como la fuerza pico logrado durante el primer ciclo de compresión.
- Cohesividad (cohesiveness) es definido como la razón del área positiva lograda durante la segunda compresión y del área positiva de la primera compresión (A_2 / A_1).
- Pegajosidad (adhesiveness) es definida como el área negativa lograda durante la primera compresión y representa el trabajo necesario para sacar el pistón de la muestra.
- Elasticidad (springiness antes llamado elasticity) es definida como la altura que recupera el alimento durante el tiempo que transcurre entre la primera y la segunda compresión.
- Gomosidad (Gumminess) es definida como el producto de dureza por cohesividad.
- Chiclosidad (Chewiness) es definida como el producto de gomosidad por elasticidad (que es igual a dureza por cohesividad y por elasticidad).

Modelos que representan el comportamiento de los alimentos con los distintos componentes

Elementos de rotura

Las características principales de este elemento son que es activado por una tensión y/o deformación crítica. (Peleg, 1983)

Activado por tensión.

Sí $\sigma \leq \sigma_c$ entonces $\sigma = \sigma$

Sí $\sigma > \sigma_c$ entonces $\sigma = 0$

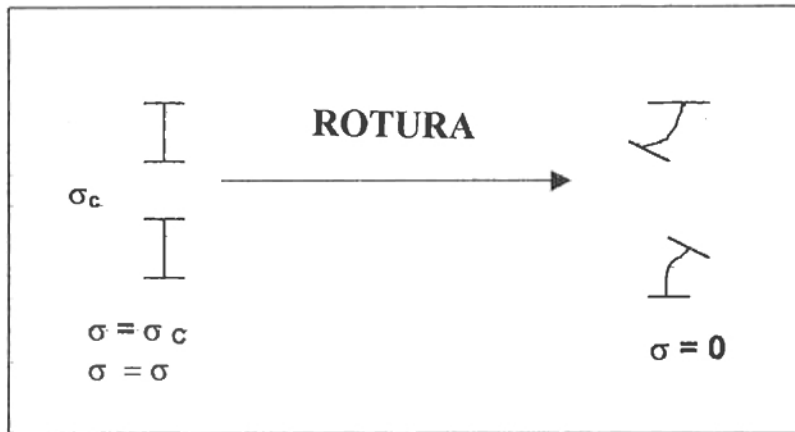


Fig.27a: Símbolo utilizado para la activación del elemento de rotura de tensión
(Peleg, 1983).

Activación por deformación

Sí $\varepsilon \leq \varepsilon_c$ entonces $\sigma = \sigma$

Sí $\varepsilon > \varepsilon_c$ entonces $\sigma = 0$

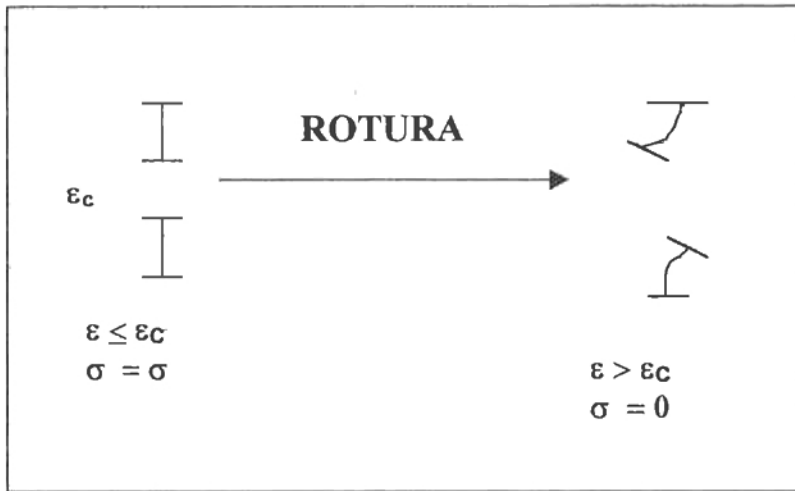


Fig.27b: Símbolo utilizado para la activación del elemento de rotura por deformación (Peleg, 1983).

y si es regulado por tensión y deformación

Sí $\sigma \leq \sigma_c$ y $\epsilon \leq \epsilon_c$ entonces $\sigma = \sigma$

Sí $\sigma > \sigma_c$ o $\epsilon > \epsilon_c$ entonces $\sigma = 0$

Se verá a continuación el caso de modelos con elementos de rotura que son actuados por tensión y deformación.

Elemento elástico y de rotura

En la figura se presentan los casos debido a tensión crítica (izquierda) y a deformación crítica (derecha).

ESFUERZO

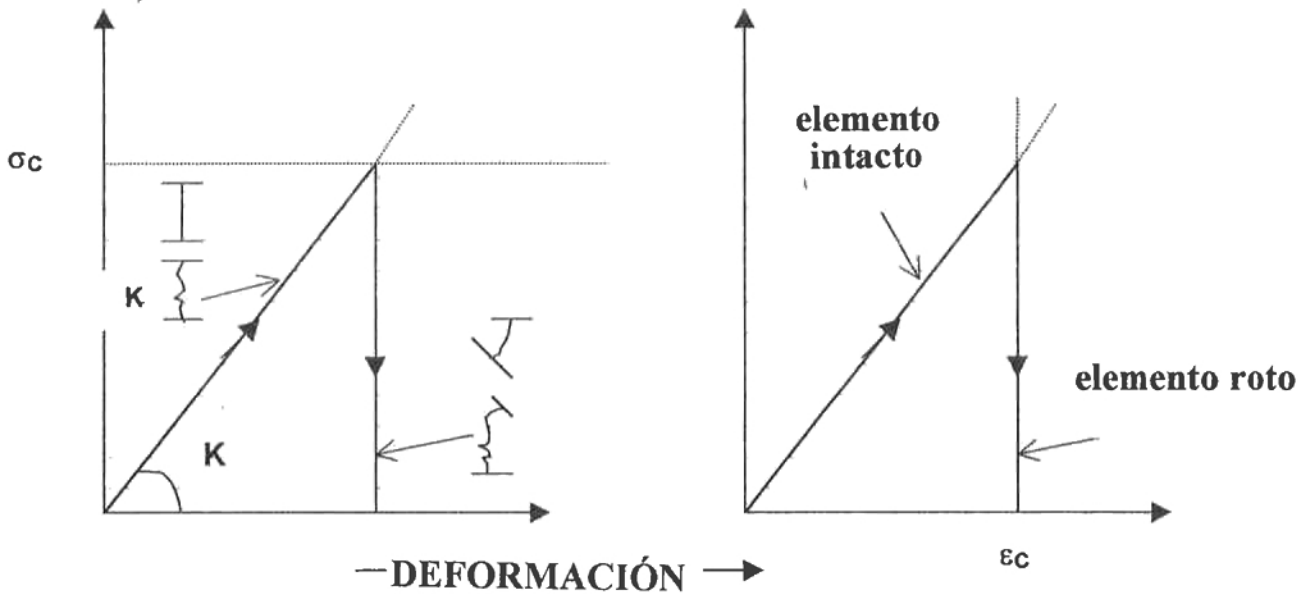


Fig.28: Relaciones tensión - deformación de un elemento elástico y uno por tensión crítica (σ_c) izquierda y deformación crítica (ϵ_c) derecha (Peleg, 1983).

Debido a que la respuesta de los elementos elásticos es independiente de la velocidad se pueden presentar tres situaciones, que son las siguientes:

$$K < \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$$

$$K > \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$$

$$K = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$$

La relación σ y ϵ para los tres casos se presenta en la figura siguiente:

ESFUERZO

$$K < \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$$

$$K \geq \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$$

$$K = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$$

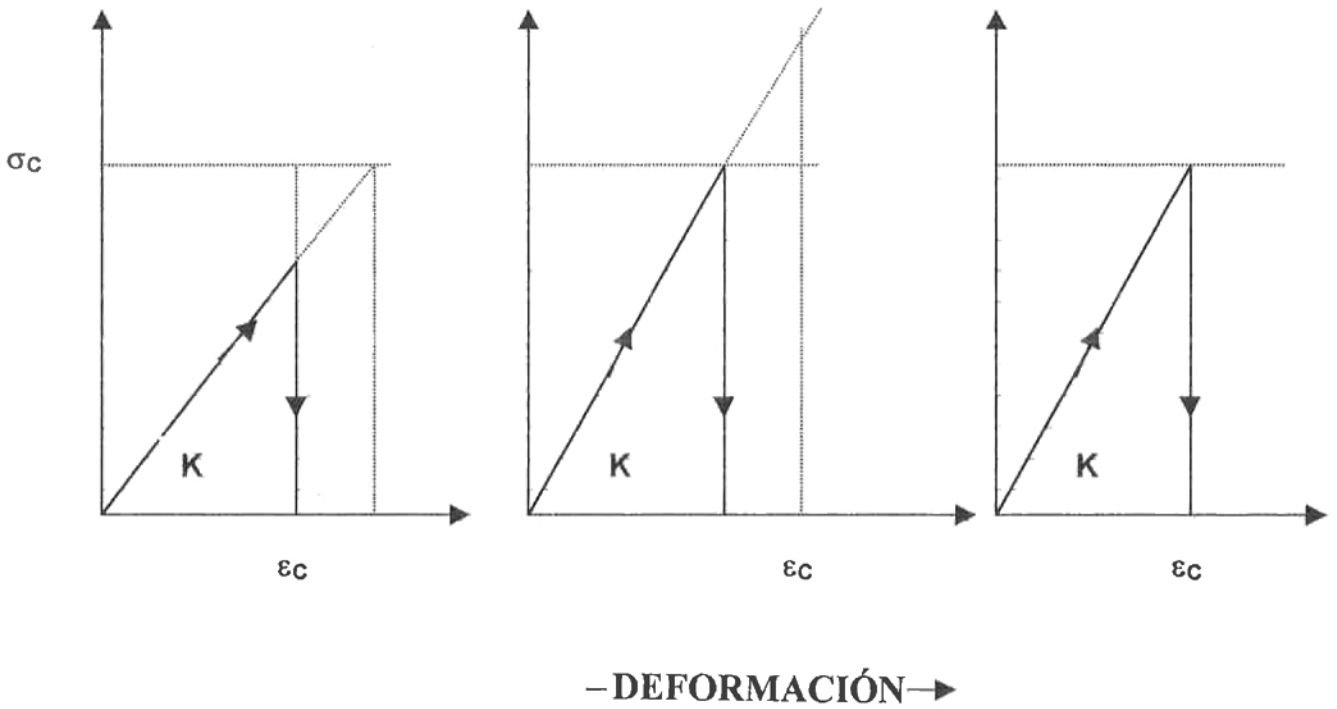


Fig.29: El efecto de los dos criterios de ruptura (σ_c y ϵ_c) en el comportamiento de un elemento plástico y de ruptura en serie (Peleg, 1983).

Elemento de Maxwell

Sí un elemento de Maxwell está en serie con un elemento de rotura la relación entre la tensión y deformación está representada por la figura siguiente:

$$\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2$$

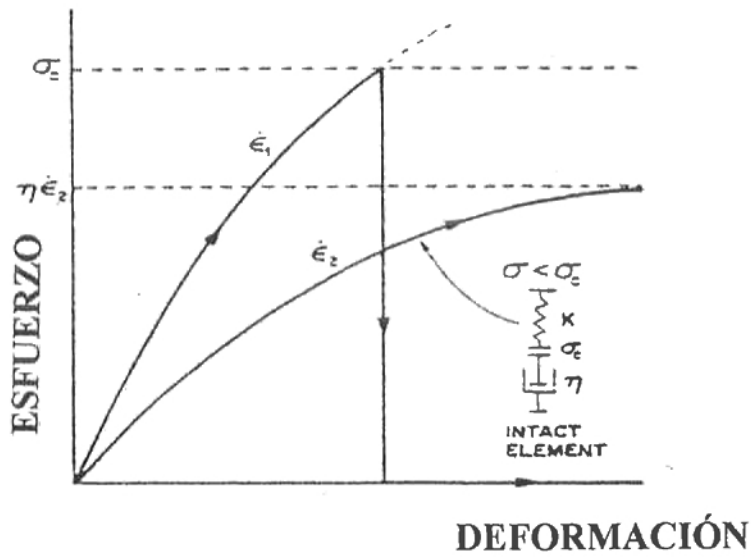


Fig.30: Relación tensión deformación de un elemento de Maxwell en serie con un elemento de rotura al ser deformado a dos velocidades de deformación $\dot{\epsilon}_1$ y $\dot{\epsilon}_2$, a σ_c (Peleg, 1983).

(Nótese que la respuesta del elemento de Maxwell a velocidad de deformación constante es

$$\sigma(\epsilon) = n \dot{\epsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{K\epsilon}{n\dot{\epsilon}}\right) \right] \text{ cuando } \epsilon \rightarrow \infty, \sigma \rightarrow \eta \dot{\epsilon}$$

Esta figura indica que si el único elemento de rotura es σ_c , es posible evitar la rotura al elegir una velocidad de deformación adecuada.

Si se agrega el efecto ϵ_c la posibilidad anterior ya no es posible según los datos de la figura siguiente:

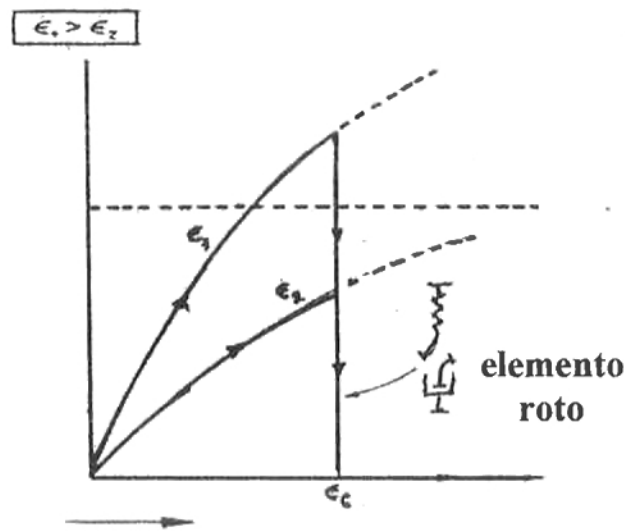


Fig.31: Relación tensión deformación de un elemento de Maxwell en serie con un elemento de rotura al ser deformado a la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_1$ y $\dot{\epsilon}_2$, a ϵ_c (Peleg, 1983).

(Nótese que la respuesta del elemento de Maxwell a velocidad de deformación constante es

$$\sigma(\epsilon) = n \dot{\epsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{K\epsilon}{n\dot{\epsilon}}\right) \right] \text{ cuando } \epsilon \rightarrow \infty, \sigma \rightarrow \eta \dot{\epsilon}$$

Si el mismo modelo es deformado a velocidad de deformación constante sometido a compresión él fallará debido a la tensión de rotura o a la deformación de rotura, esto es debido a que al ser sometido a deformación la tensión aumenta. Esto se aclara con la figura siguiente:

ESFUERZO

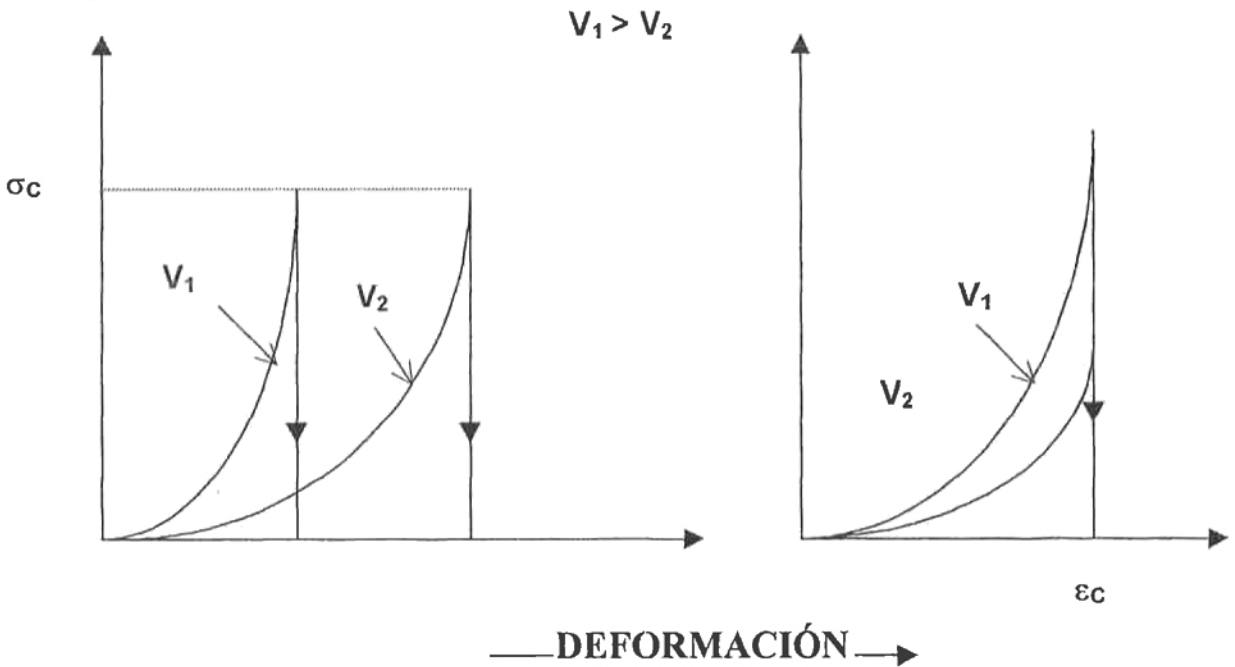


Fig.32: Relación tensión deformación de un elemento de Maxwell con un elemento de rotura sometido a compresión con dos velocidades de deformación (Peleg, 1983).

Relajación y Creep

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

En el caso del creep la deformación aumenta con el tiempo y con la incorporación de un elemento de rotura ϵ_0 que sucede no puede ser explicado solo con el único criterio de la tensión según se ve en la figura siguiente.

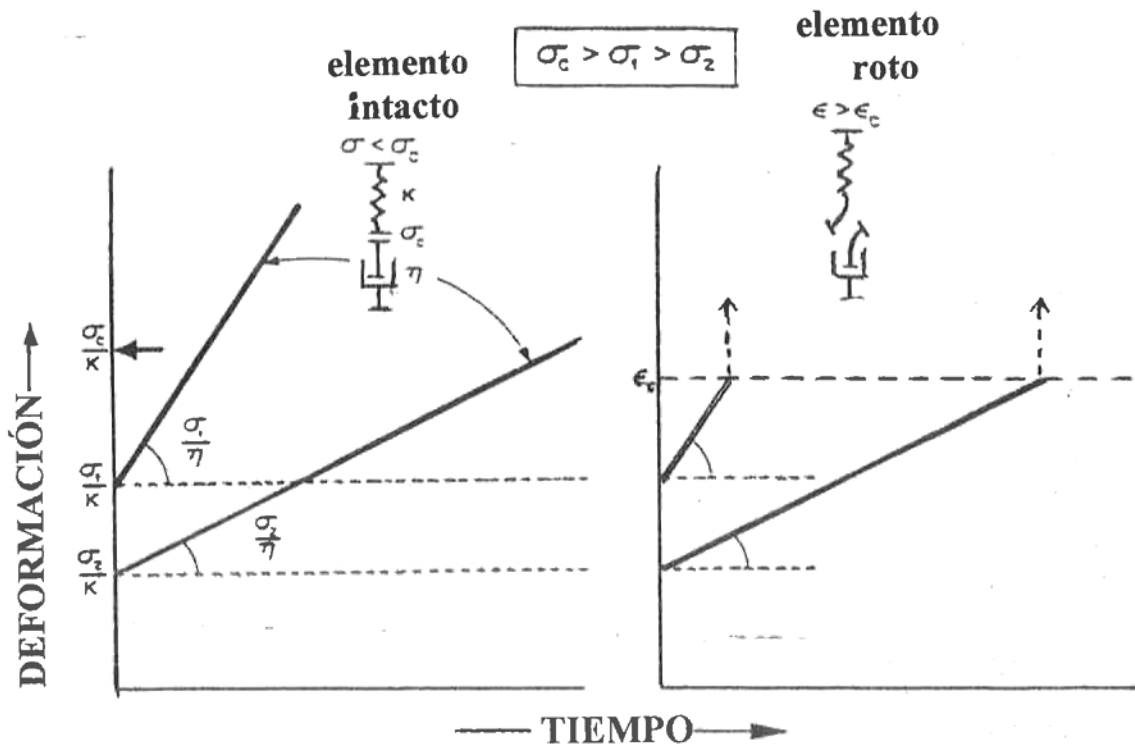


Fig.33: Curvas de creep de un elemento de Maxwell en serie con un elemento de rotura; a la izquierda el criterio de rotura es la tensión crítica y a la derecha es la deformación crítica (Peleg, 1983), σ_1 y σ_2 son las tensiones constantes y σ_c es la tensión de rotura, ϵ_c es la deformación de rotura.

Combinación de elementos

Cualquier combinación de elementos produce modelos reológicos discontinuos en que al menos un elemento es 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 va a analizar 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 (tensión acumulada de falla) y pegajosidad (área bajo la curva hasta la rotura).

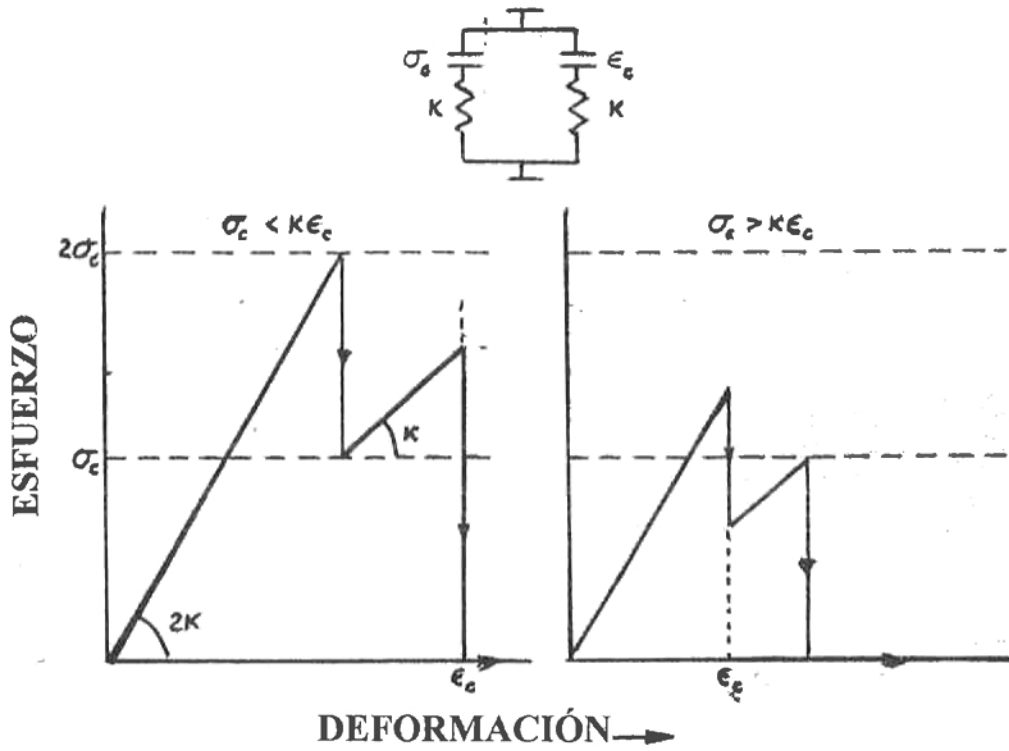


Fig.34: La relación diente de sierra entre el esfuerzo y la deformación de un modelo formado por dos elementos elásticos y de rotura con diferentes tipos de criterio de activación σ_c y ϵ_c (Peleg, 1983).

El modelo siguiente está formado por un modelo elástico en paralelo con un Maxwelliano y cada componente tiene nivel de deformación de rotura diferente ϵ_{c1} y ϵ_{c2} .

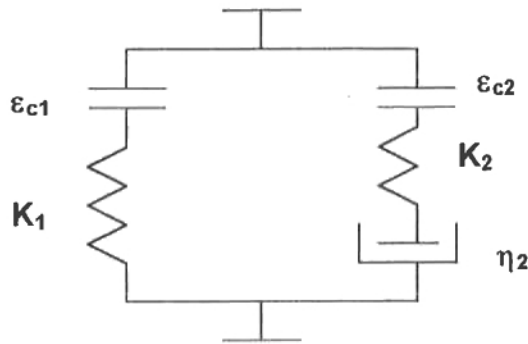


Fig.35: Esquema de un modelo de tres elementos (Peleg, 1983).

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

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

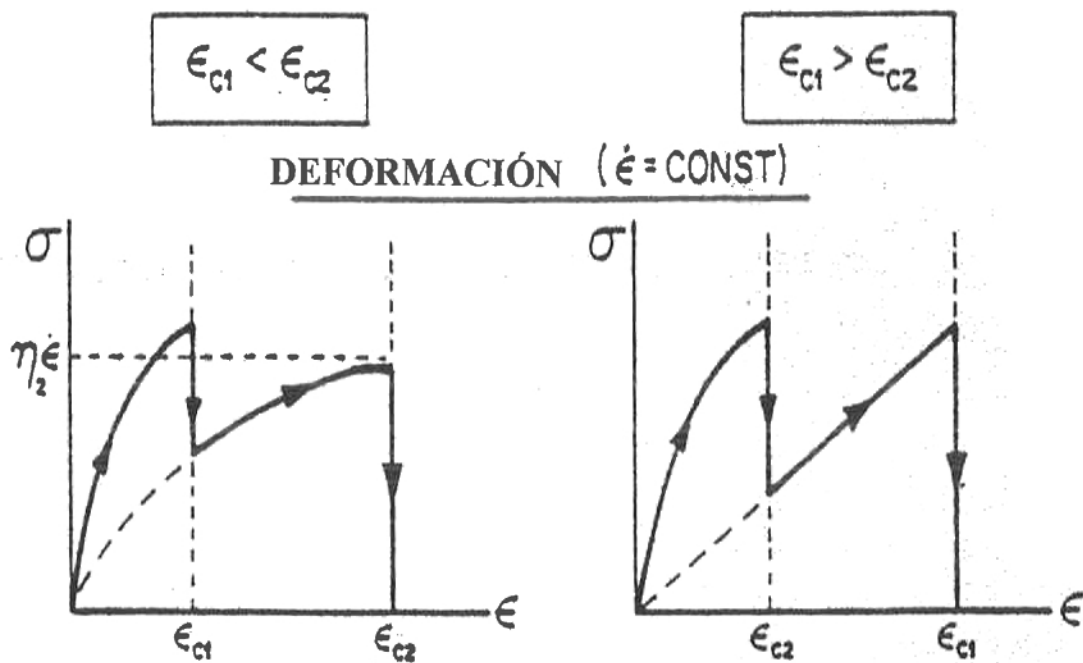


Fig.36. Esquema de las posibles respuestas de un modelo de tres elementos con dos criterios de ruptura (ϵ_{c1} y ϵ_{c2}) en la deformación a velocidad de deformación constante (Peleg, 1983).

ESFUERZO RELAJACIÓN

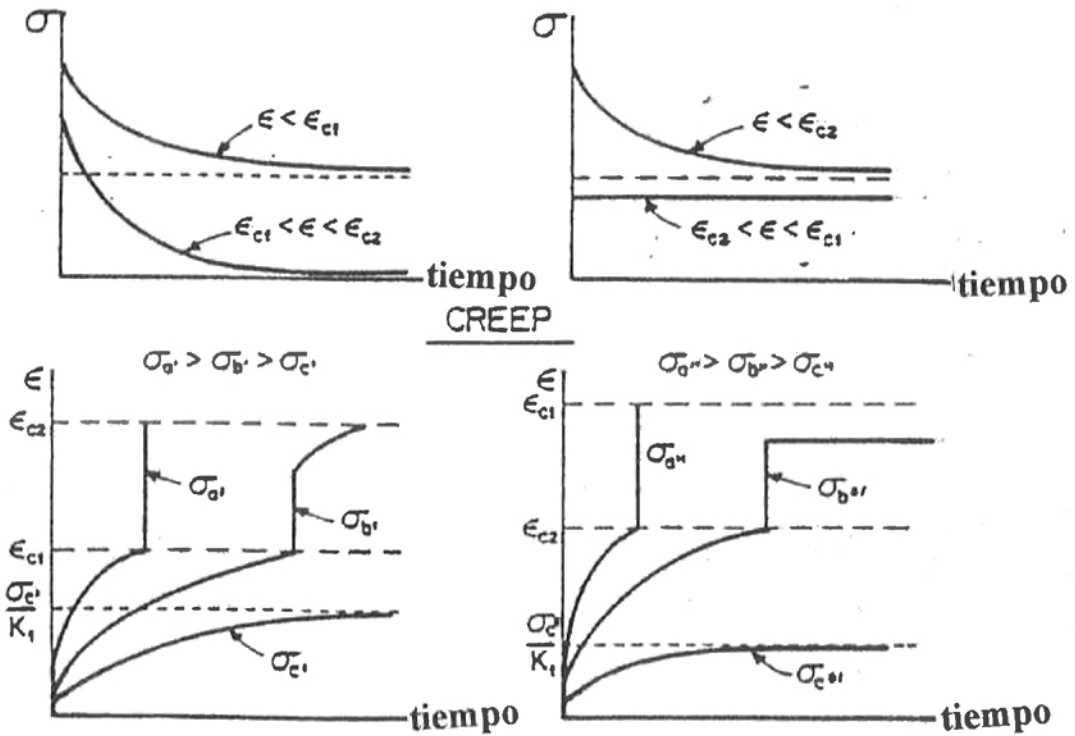


Fig.37: Esquema de las posibles respuestas de un modelo de tres elementos con dos criterios de ruptura (ϵ_{c1} y ϵ_{c2}) en pruebas de relajación y creep (Peleg, 1983).

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 rotura analizados incluidos en dos formas:

Uno es que el elemento de rotura por tensión o por deformación se fija a un nivel o a varios niveles discretos y la otra forma es que sean agregados en forma continua.

Con esta situación, el número de posibilidades para simular con los modelos el comportamiento reológico de algún material llega a ser infinito y fuertemente dependiente de las funciones de distribución de la tensión de ruptura capaces de producir las respuestas reológicas encontradas esto sería mejor si se incluyen los elementos de contacto respectivos.

En general, Peleg (1983) plantea que la respuesta simulada de tales modelos sería de la forma mostrada en la figura que serían funciones nuevas.

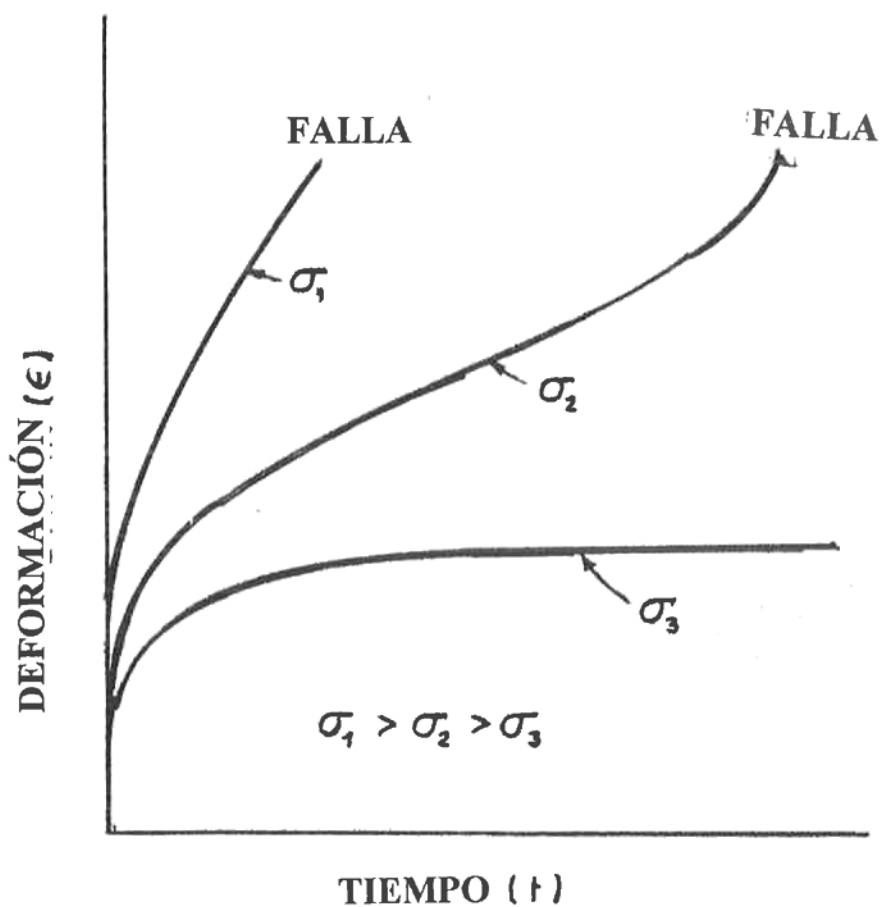


Fig.38: Esquema de las curvas típicas de creep obtenidas de materiales sólidos a diferentes tensiones (Peleg, 1983).

Aunque Peleg (1976, 1979) plantea el criterio de la deformación crítica, cualquier debilitamiento estructural en creep puede ser únicamente descrito en términos complicados de elementos de rotura 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 queda plantado a la simplificación de la modelación matemática.

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

Se considera un modelo de Maxwell generalizado.

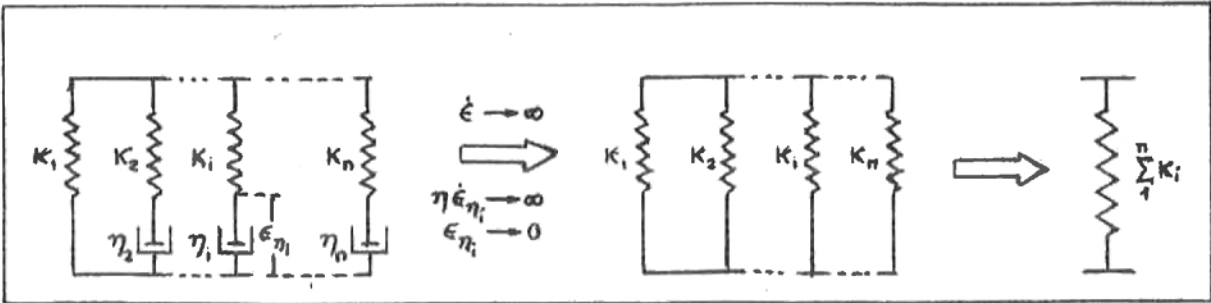


Fig.39: Esquema del modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Normand, 1982).

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:

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

donde:

σ_i es la tensión del elemento i

η_i es la viscosidad del elemento i

$\dot{\epsilon}_i$ es la 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:

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

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

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

donde:

σ : tensión

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

ε : deformación

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

K : constante elástica

η : viscosidad

τ : η / K es el tiempo de relajación.

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

$$K = \dot{\sigma} / \dot{\varepsilon}$$

$$\text{o } \sigma = K \varepsilon$$

o sea, es un cuerpo de comportamiento elástico. Esto se representa en la figura 39.

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

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 τ (Peleg y Normand, 1982).

Este análisis es válido según Peleg y Normand (1982) 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.

Modelos lineales y no lineales

Se sabe que muchos alimentos presentan propiedades viscoelásticas no lineales especialmente al aplicar deformaciones grandes; también se presentan casos en que los elementos que pueden representar el comportamiento pueden cambiar su número con la deformación y con la historia de la deformación.

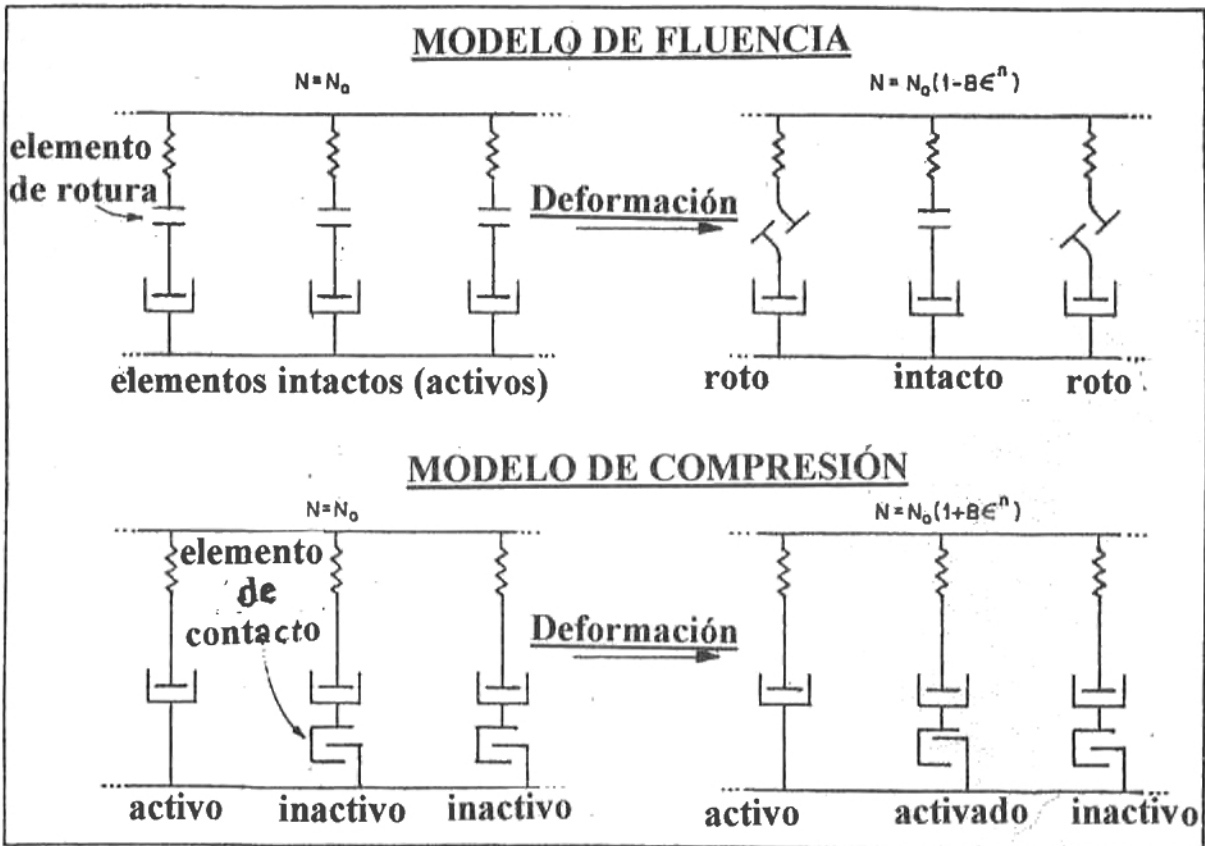


Fig.40: Representación esquemática del modelo de Maxwell generalizado con los elementos para representar comportamientos de fluencia y compresión cuando estos varían con la deformación (Peleg y Normand, 1982).

Los modelos están basados en el de Maxwell generalizado con elementos, número de elementos y propiedades que están siendo continuamente cambiados por roturas y activación según plantea Peleg y Normand (1982) en la figura 39.

De acuerdo al estudio anterior, 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 de la tensión, 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.

El análisis que se presenta a continuación se aplicará a situaciones en que el número relativo de elementos con tiempos de relajación corto es constante según figuras 41 y 42 o variable figura 40.

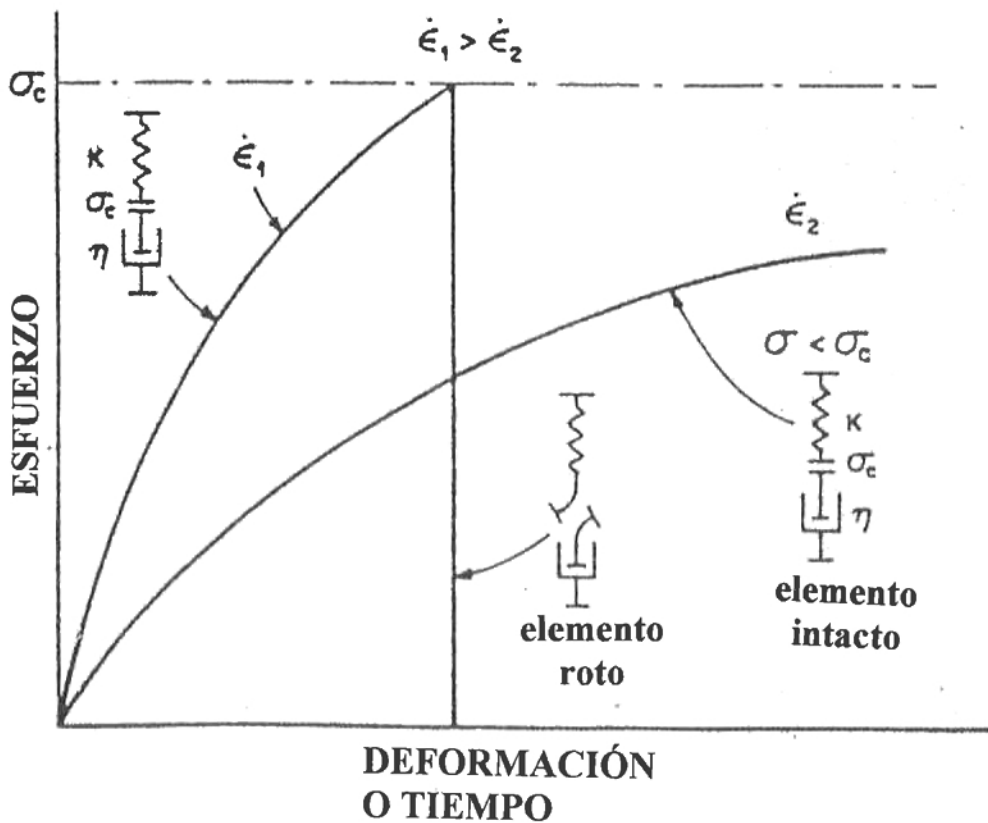


Fig.41: Esquema del modelo utilizado para el estudio (Peleg y Normand, 1982).

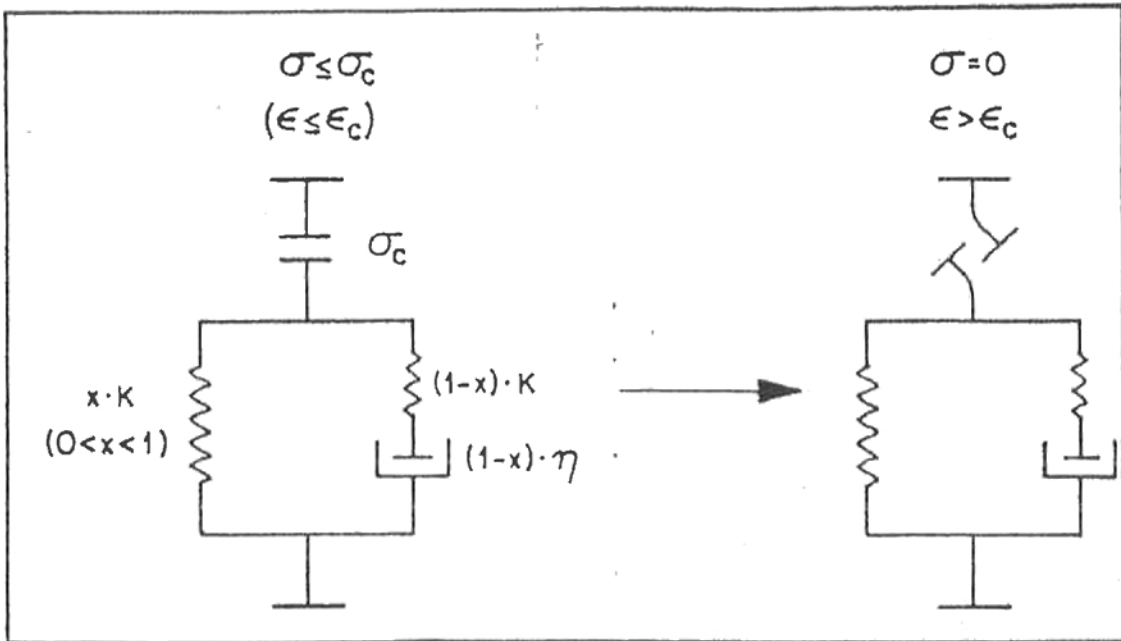


Fig.42: Esquema del modelo utilizado para el estudio (Peleg y Normand, 1982).

Peleg y Normand (1982) seleccionaron dos tipos de alimentos a analizar.

Queso es un alimento que presenta fluencia, esto significa que los elementos disminuyen continuamente.

Pan que representa los materiales compresibles que representan la situación de los alimentos en que el número de elementos aumenta continuamente.

Peleg y Normand (1982), plantean que pueden representar ambas situaciones con las ecuaciones siguientes:

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

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

donde:

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

N_0 : es el número inicial de elementos

B, n : constantes

Caso de fluencia

Para la simulación de las relaciones tensión deformación, estas funciones con $n = 2$ se aplican a un elemento de Maxwell (σ_M) con el elemento de rotura con tensión de rotura σ_c tal como se presenta en la figura 41, con lo que se obtiene la ecuación siguiente:

$$\sigma(\varepsilon) = N(\varepsilon) \sigma_M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \tau, \sigma_c)$$

Caso compresión

Al estudiar el efecto elástico la tensión es:

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

donde:

x es la fracción de elementos elásticos

K constante del resorte

Relación tensión deformación de un elemento de Maxwell

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

$$\dot{\varepsilon} = \text{cte.}$$

$$\sigma_M(\varepsilon) = \eta \dot{\varepsilon} \left(1 - \exp\left(\frac{\varepsilon}{\tau \dot{\varepsilon}}\right) \right)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{H_0 - V \cdot t}$$

donde:

H_0 es la longitud de la muestra

Peleg (1977) plantea que la tensión cumple:

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

donde:

a: es el recíproco del tiempo de relajación τ ($\tau = 1/a$)

b: es el 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 $\varepsilon = A \text{ Sen}^2 \omega t$

donde:

A: amplitud

ω : frecuencia angular

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

La velocidad de deformación instantánea es: $\dot{\varepsilon} = A \text{ Sen}^2 \omega t$

La respuesta del elemento de Maxwell es:

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

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.

Dureza

Peleg (1980) plantea que la dureza es percibida como fuerza ejercida por los dedos, mandíbula y lengua.

La superposición de la intensidad de respuesta sensorial a la sensibilidad mecánica está revelando una relación teórica entre la dureza mecánica y la sensorial salvaguardando que el elemento sensorial y el mecánico tienen rangos donde se presenta la mayor sensibilidad.

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 tensión de relajación es función de la historia de deformación del sistema y de las magnitudes absolutas y relativas de las unidades constituyentes del modelo.

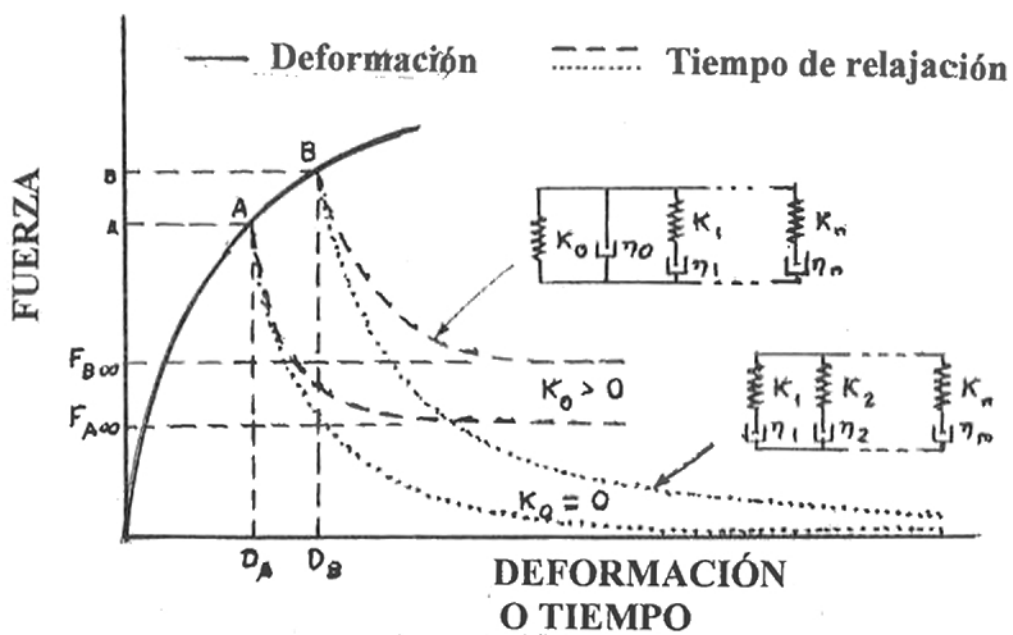


Fig.43: Representación esquemática de las curvas de fuerza de relajación de modelos deformados de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976).

En la figura 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.

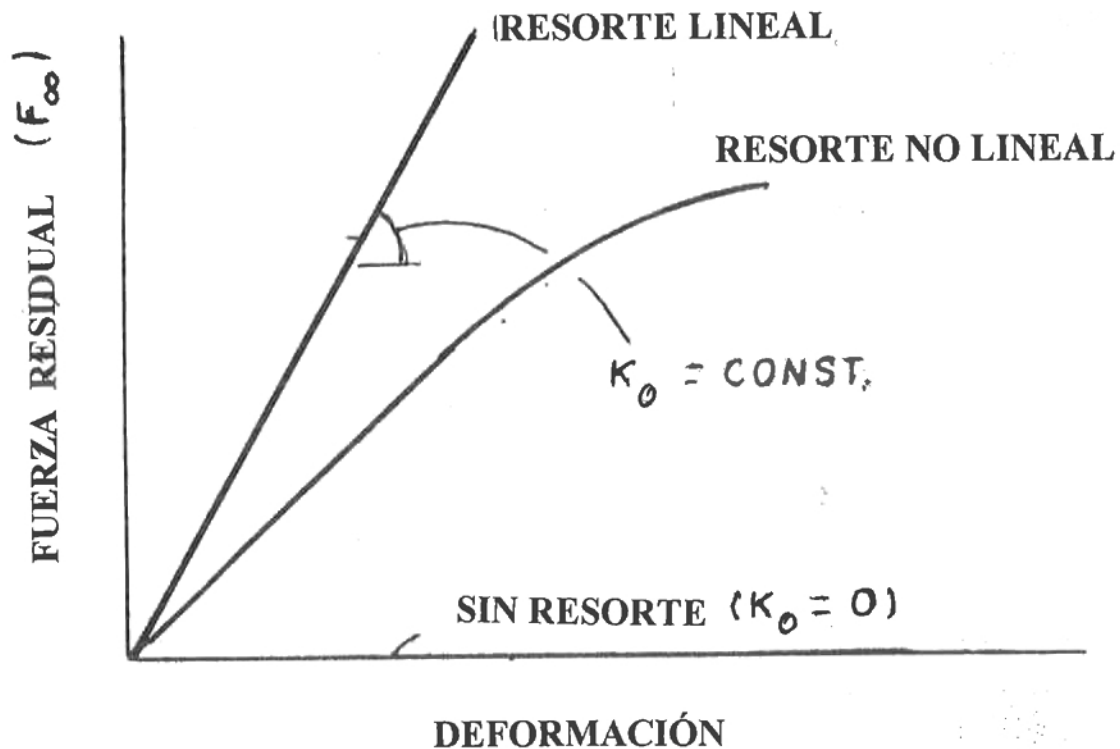


Fig. 44. relaciones entre fuerza residual (F_{∞}) y deformación de un modelo de Maxwell generalizado (Peleg y Calzada, 1976).

En el caso que no haya resorte significa $K_0 = 0$ y la fuerza igual a cero y puede presentarse situaciones en que K_0 es constante y que sea variable (ver Fig. 44). 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) (figura 43) 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 existencia 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.

O sea, que independientemente de los elementos de Maxwell presentes en el modelo la curva de relajación que parte de valores más altos de fuera estará sobre otra que parte de valores más bajos (ver Fig. 43).

En el caso de algunas frutas y vegetales las características de las curvas de relajación son consecuencias naturales del modelo reológico aplicado que no se puede garantizar 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.- Existe una etapa en que no se produce ningún cambio físico permanente y la deformación es netamente e independiente de la velocidad.

2.- Existe la etapa en que se producen gradualmente cambios irreversibles. Esto puede deberse a rupturas de tejidos o elementos celulares que gatillan sistemas enzimáticos.

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 está mostrando diferentes comportamientos viscoelásticos si se compara con las etapas previas de ruptura.

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

También hay que recordar el efecto tridimensional de las tensiones reales. Hay que recordar que se producen cambios progresivos del área del material ensayado y que cuando se producen grandes deformaciones puede llegar a ser importante.

Peleg y Calzada (1976) establecieron en sus estudios con manzanas, peras y papas que deformaciones grandes serían las mayores al 5% y en estos tres productos no se ajustan muy bien a lo predicho al aplicar un modelo lineal de Maxwell generalizado y podría ser mejor explicarlo con el modelo de Peleg (1976).

Este es un modelo en que cada elemento individual de Maxwell tiene incorporado un elemento de rotura y se presenta en la figura 45

La disposición de estos elementos permite distinguir tres tipos de comportamiento.

- 1.- Etapa elástica independiente de la velocidad.
- 2.- Etapa de comportamiento Maxwelliano.
- 3.- Etapa de rotura y eliminación de la disposición.

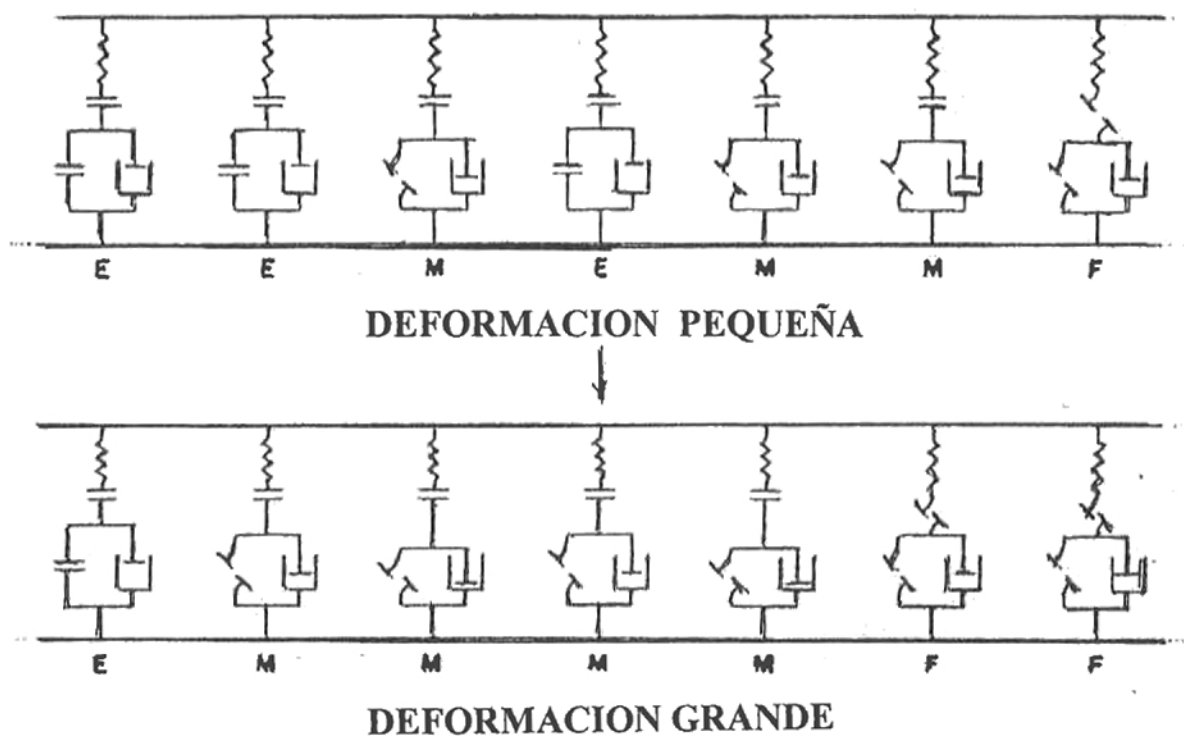


Fig. 45: Representación esquemática del modelo general a dos niveles de deformación (Peleg y Calzada, 1976).

E: elemento en la etapa elástica.

M: elemento en la etapa de Maxwell

F: elemento de rotura.

En el modelo uno de los efectos del aumento de la velocidad de deformación es que provoca más rotura de los elementos de Maxwell a una deformación dada.

El resultado final puede ser una fuerza mayor a la misma deformación debido a las deformaciones es determinada en este momento y la fuerza empieza a relajarse, el aumento de los elementos rotos provoca un descenso más acentuado de la curva fuerza de relajación a la deformación fijada.

Curvas de relajación de alimentos

Las propiedades viscoelásticas de los alimentos se visualizan mejor por medio de las curvas de relajación.

Peleg (1976) propone normalizar y caracterizar las curvas de relajación.

Plantea que una representación matemática ideal de un fenómeno físico está basado en las siguientes consideraciones:

- 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.

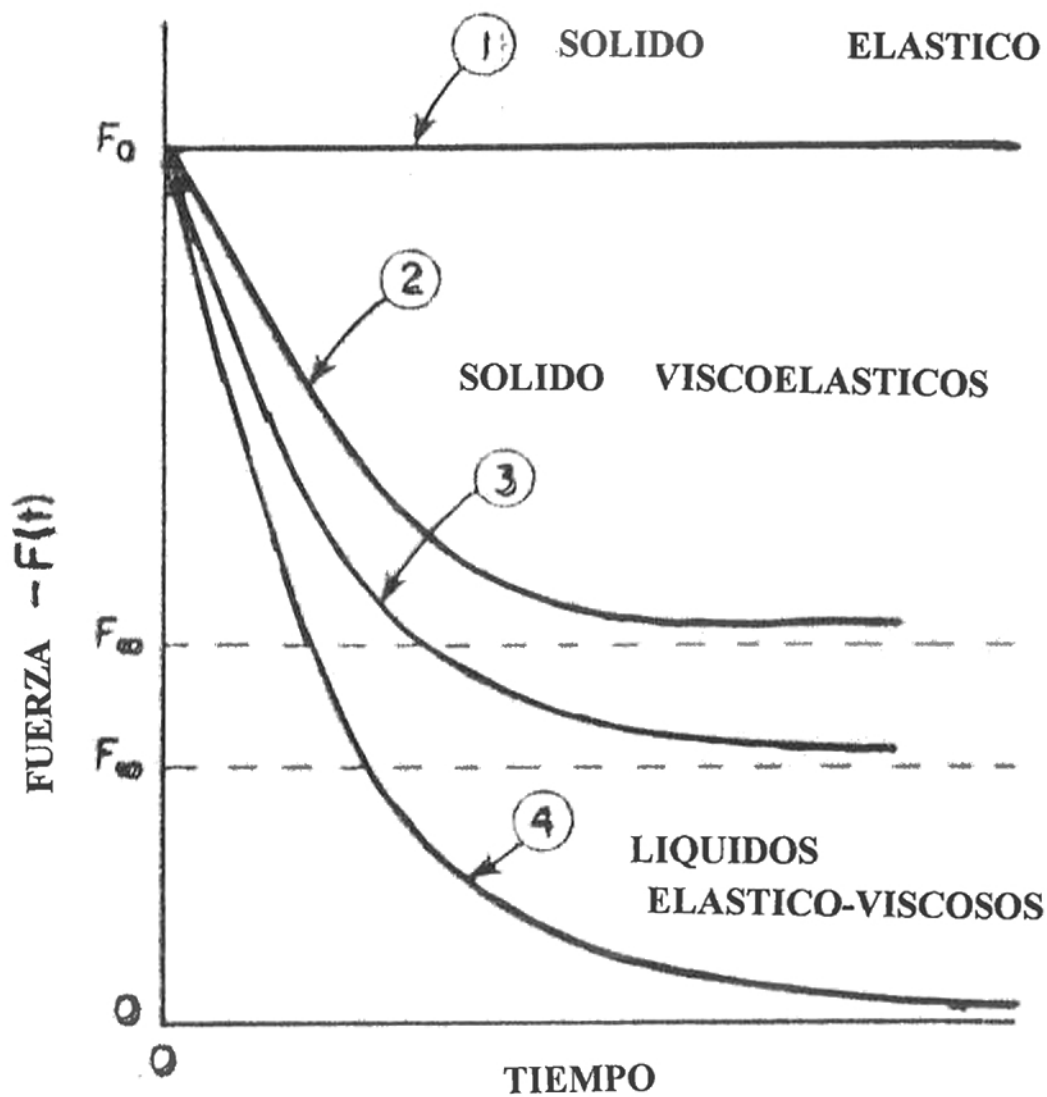


Fig. 46. Curva de relajación de sólidos elásticos, sólidos viscoelásticos y líquidos viscoelásticos (Peleg, 1979).

Peleg aplica estas condiciones al modelo matemático de las curvas de relajación.

Las curvas de relajación se pueden apreciar en la figura 46 donde se representa el comportamiento del sólido elástico (curva 1), sólidos viscoelásticos (curvas 2 y 3) y líquidos viscoelásticos (curva 4).

Normalización de las curvas de relajación.

Las curvas de relajación han sido normalizadas con la ecuación siguiente:

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

donde:

$F(t)$: es la fuerza a t minutos de relajación.

F_0 : es la fuerza a $t = 0$ de relajación

No hay que olvidar que la relajación se mantiene constante durante la relajación. En la figura 47 se representan las curvas normalizadas desde el sólido elástico (curva 1), sólidos viscoelásticos (curvas 2 y 3) y líquidos viscoelásticos (curva 4).

Curvas caracterizadas de relajación

Las formas típicas de la función $Y(t)$ v/s t sugiere que podrían tener la forma matemática siguiente:

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

Siendo a y b constantes.

B. CURVAS NORMALIZADAS
EN LA FORMA:

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

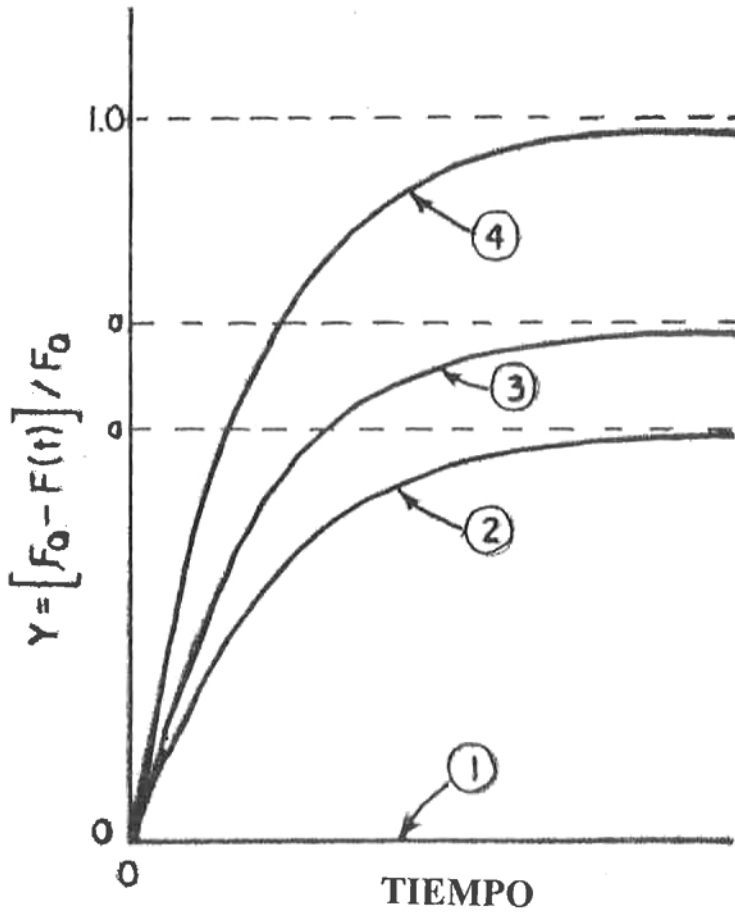


Fig. 47. Curva de relajación normalizadas de sólidos elásticos (1), sólidos viscoelásticos (2 y 3) y líquidos viscoelásticos (4) (Peleg, 1976).

$$\underline{C}, \text{ SI } \gamma = \frac{abt}{1+bt}$$

$$\text{ENTONCES: } \frac{t}{\gamma} = \frac{1}{ab} + \frac{t}{a}$$

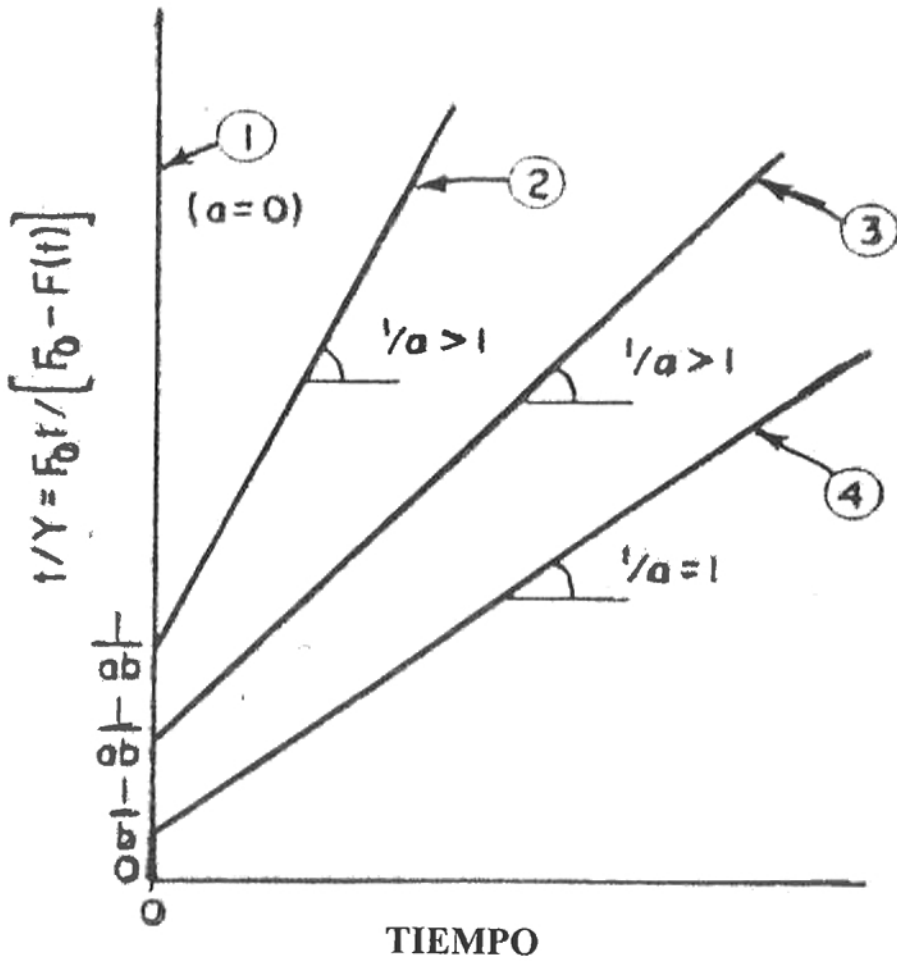


Fig. 48. Curva de relajación linealizada de sólidos elásticos (1), viscoelásticos (2 y 3) y líquidos viscoelásticos (4) (Peleg 1976).

El significado de a (adimensional) es 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 a valor cero (líquido). Para valores $0 < a < 1$, a presenta el valor asintótico residual de $Y(\infty)$.

La constante b (1/min) es la que presenta la velocidad a la cual el esfuerzo se relaja ($1/b$) es el tiempo necesario para alcanzar el valor $a/2$. Si $b=0$ el esfuerzo no se relaja totalmente (sólido elástico ideal). En término de la curva de relajación el valor alto de b indica un descenso más marcado de la curva de relajación al valor residual.

Una característica matemática de la ecuación anterior es que es una línea recta cuando se presenta en la forma siguiente:

$$\frac{t}{Y(t)} = \frac{1}{ab} + \frac{t}{a}$$

En las figuras siguientes se presentan datos experimentales de diferentes alimentos.

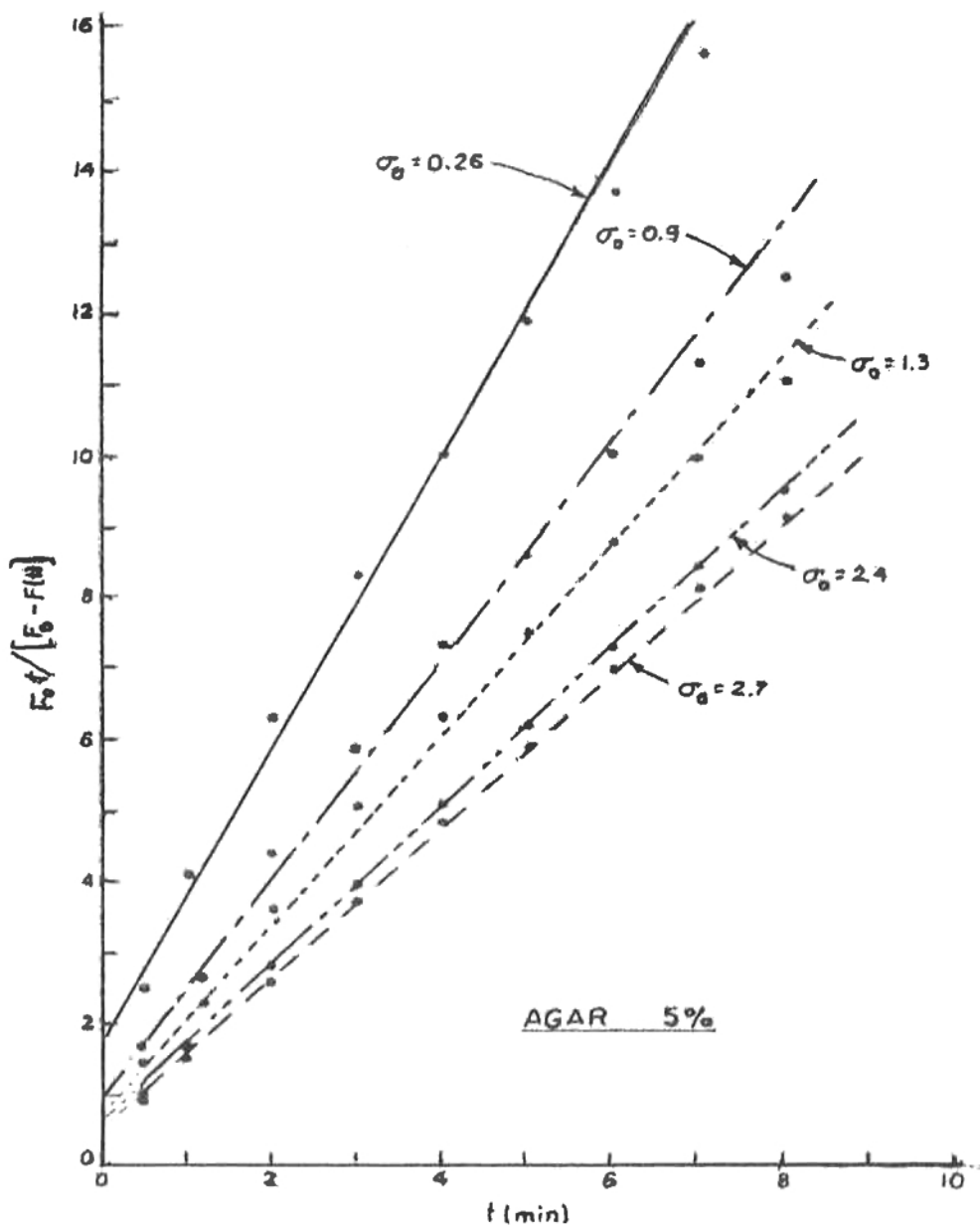


Fig. 49: Curva de relajación normalizada de gel de agar (5%) (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).

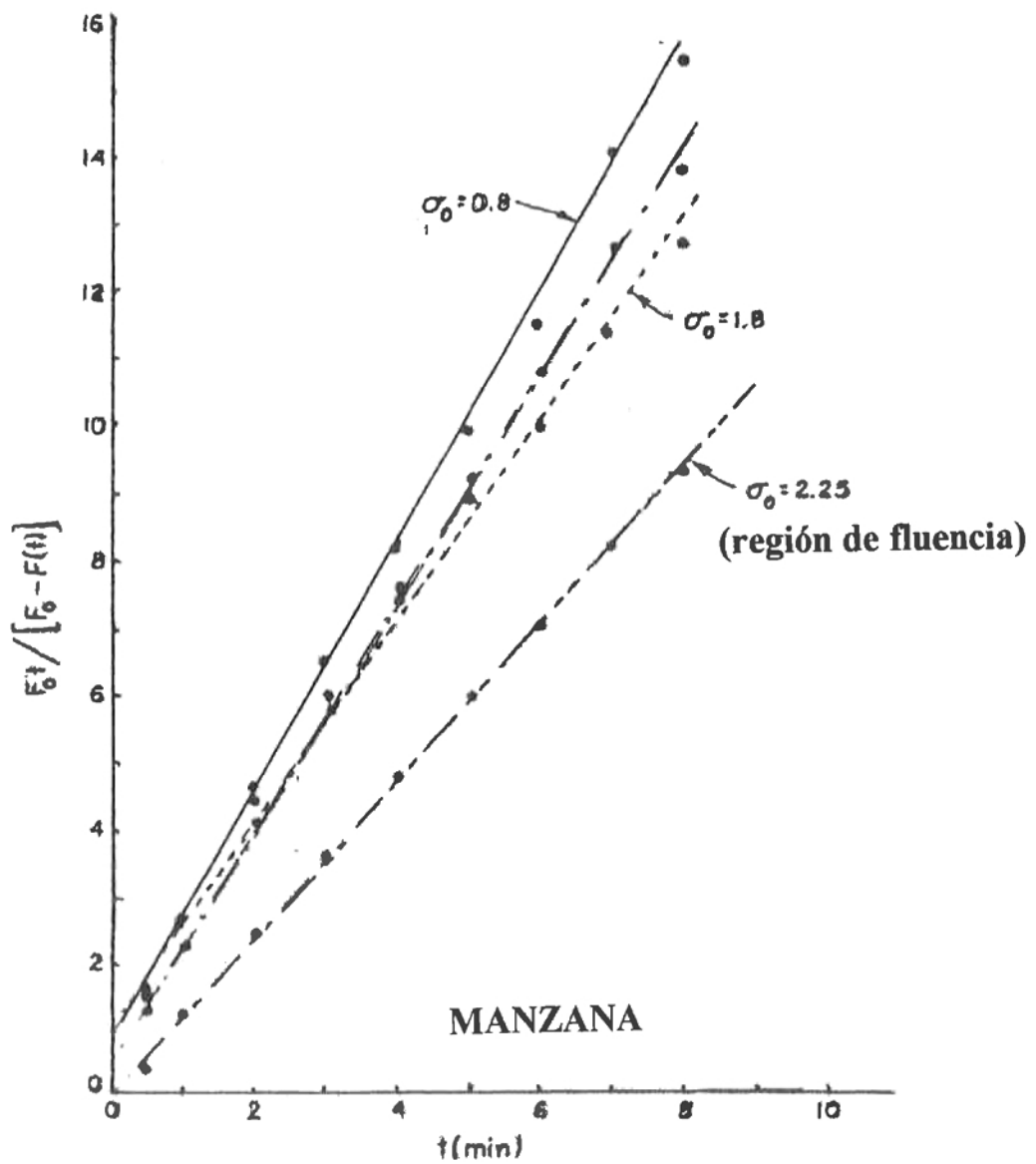


Fig. 50: Curva de relajación normalizada de manzana (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).

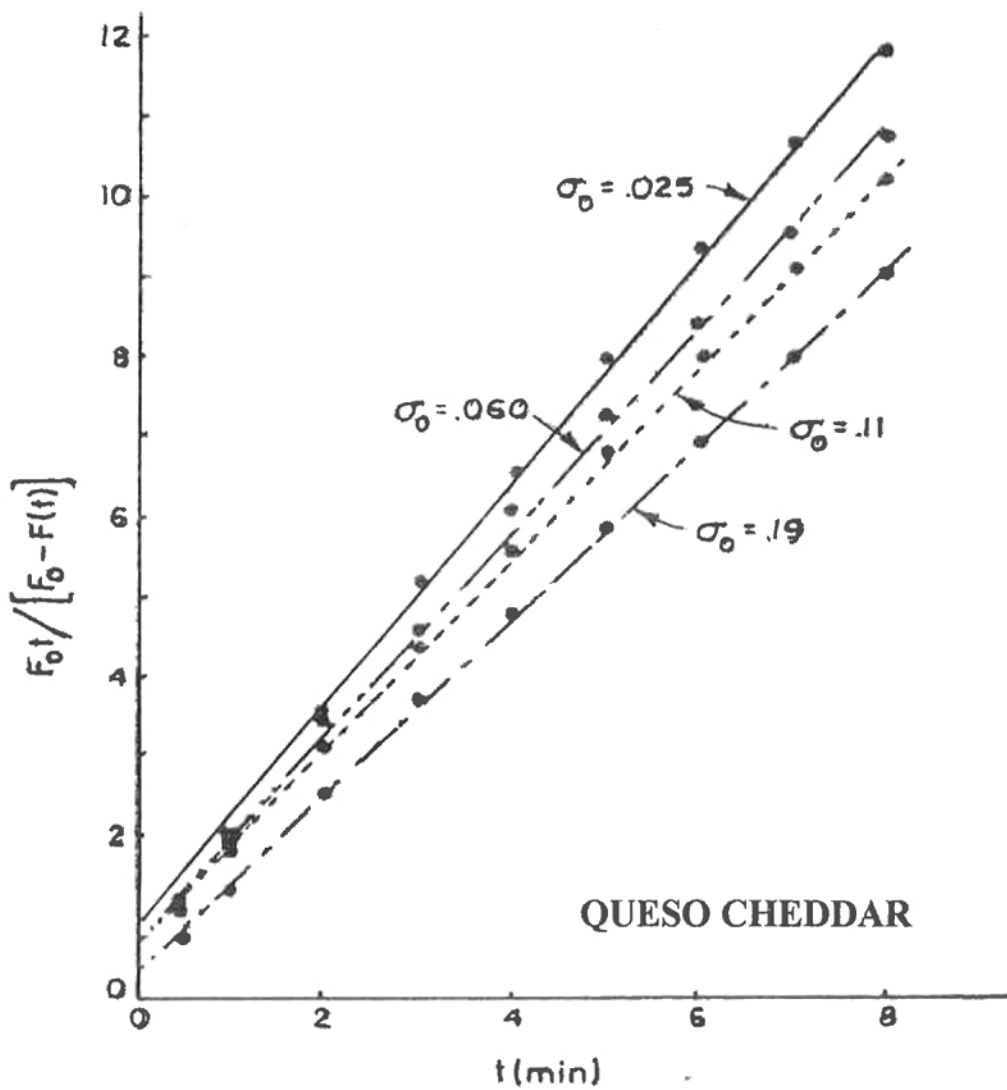


Fig. 51: Curva de relajación normalizada de queso cheddar (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).

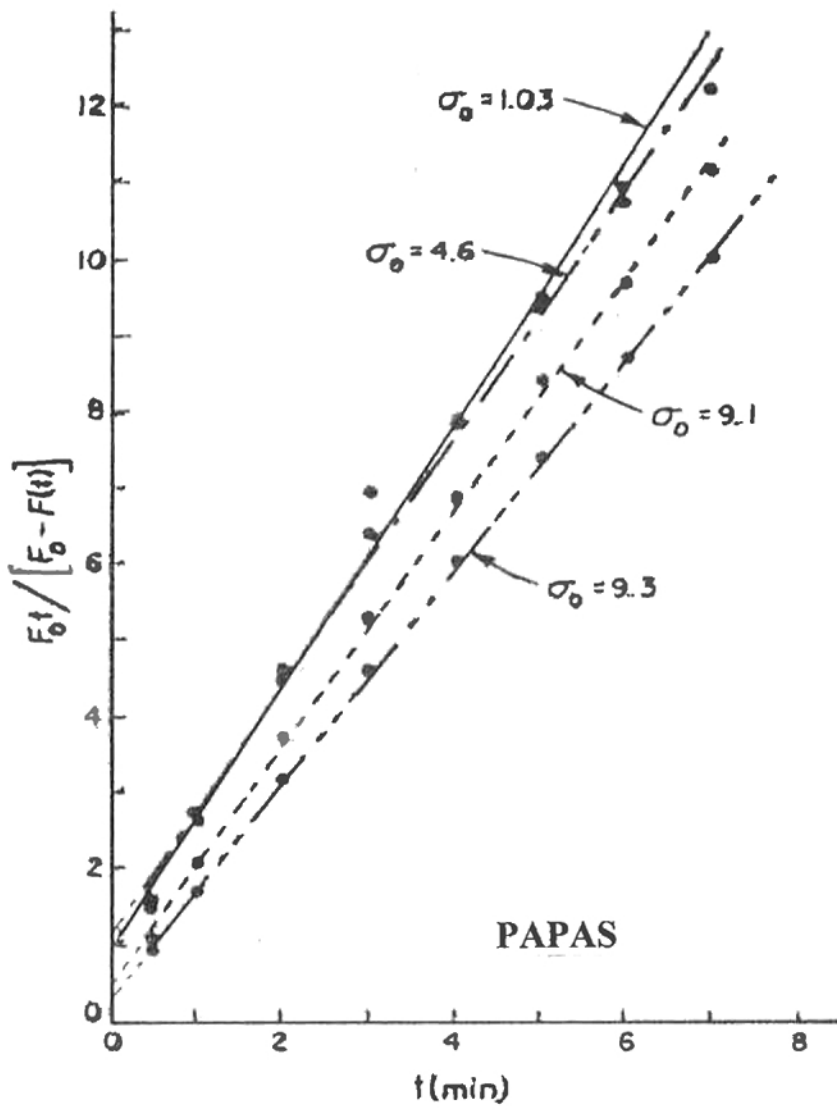


Fig. 52: Curva de relajación normalizada de papa (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).

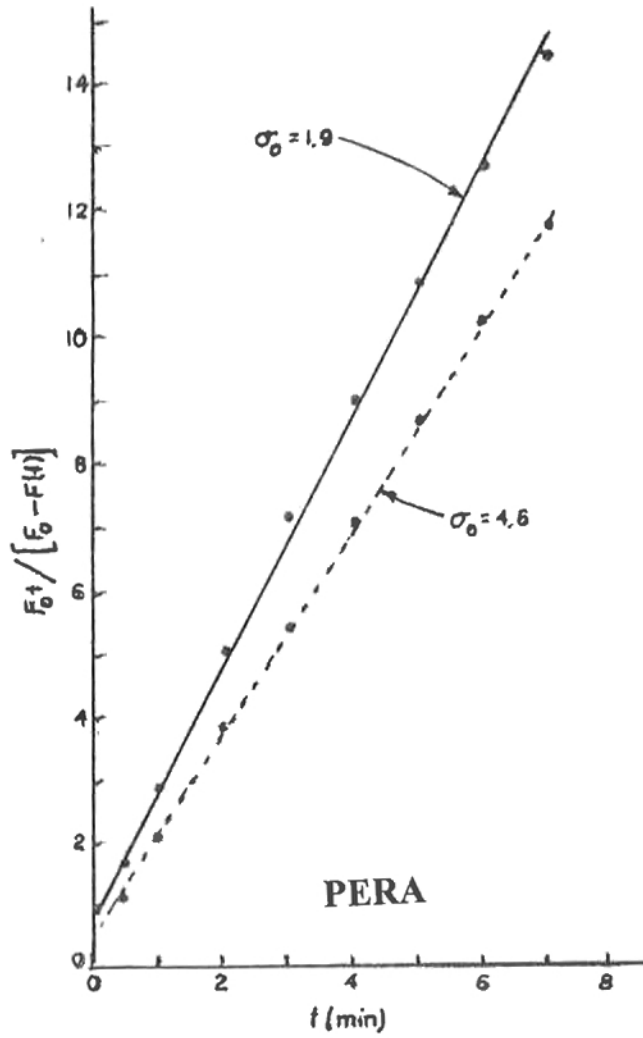


Fig. 53: Curva de relajación normalizada de pera (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).

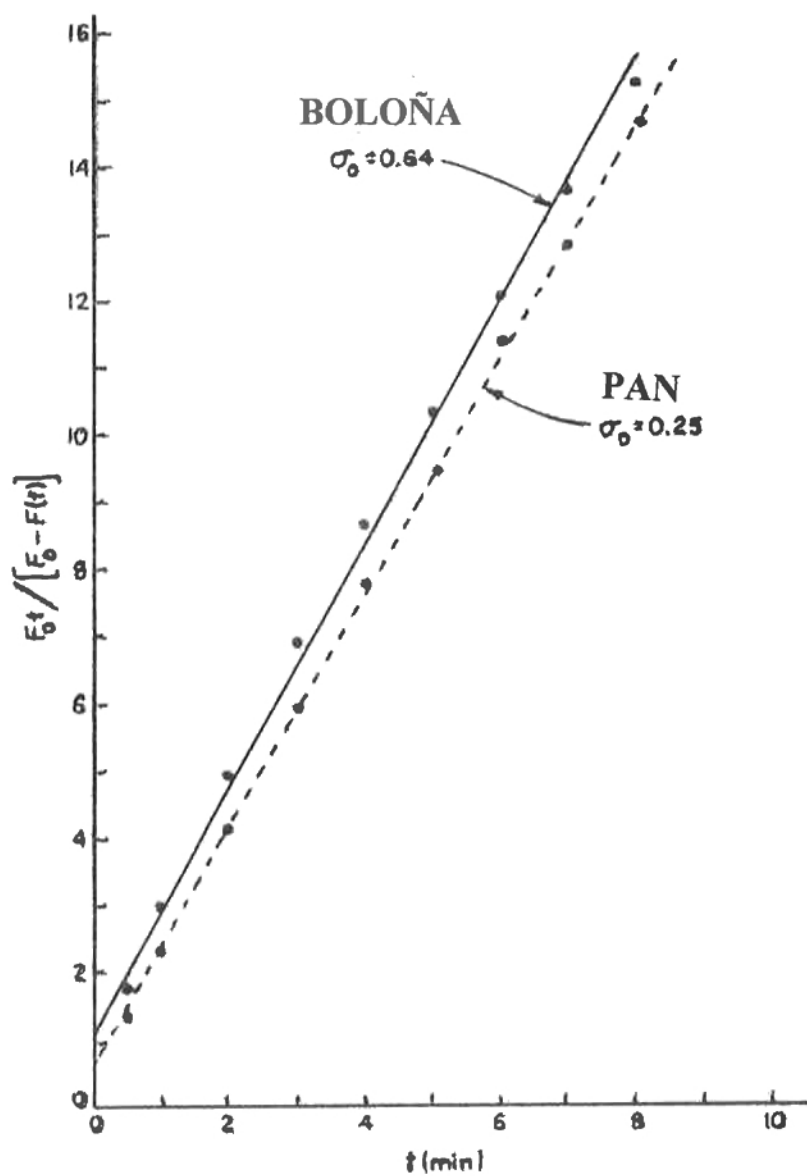


Fig. 54: Curva de relajación normalizada de boloña y pan (σ_0 es el esfuerzo aparente inicial en kg/cm^2) (Peleg y Calzada, 1976).

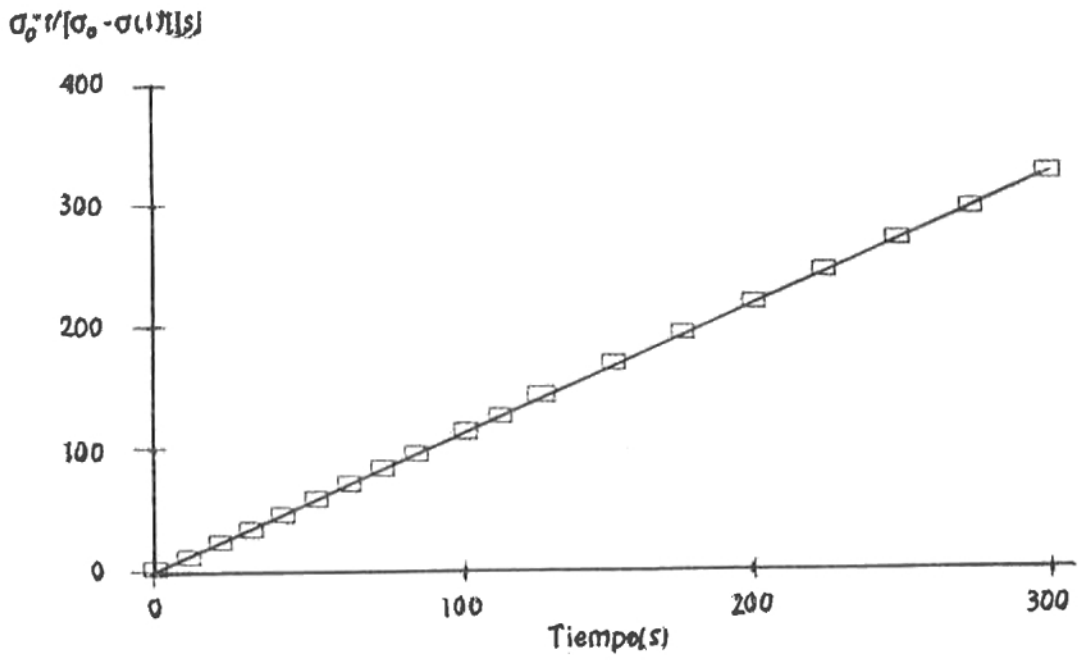


Fig. 55: Curva típica de linealización de Peleg (Nussinovich y col., 1990).

En las figuras siguientes se presentan casos de pastas para producir vienas en que se aplicó la linealización de Peleg y a vienas propiamente tal.

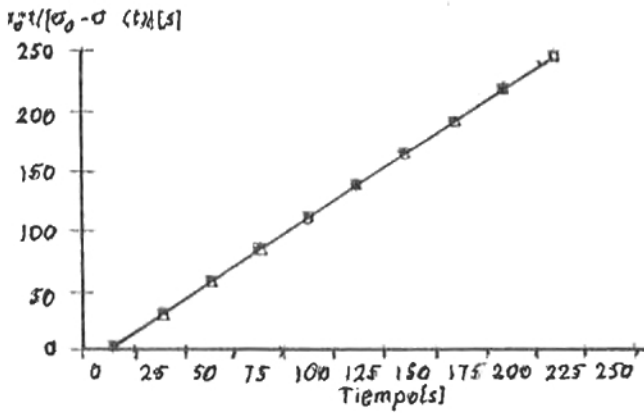
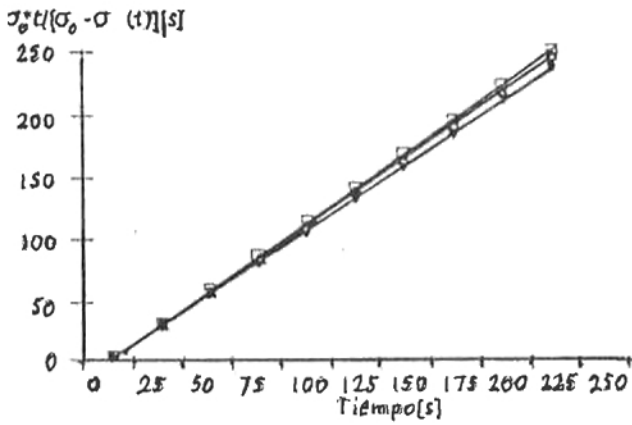
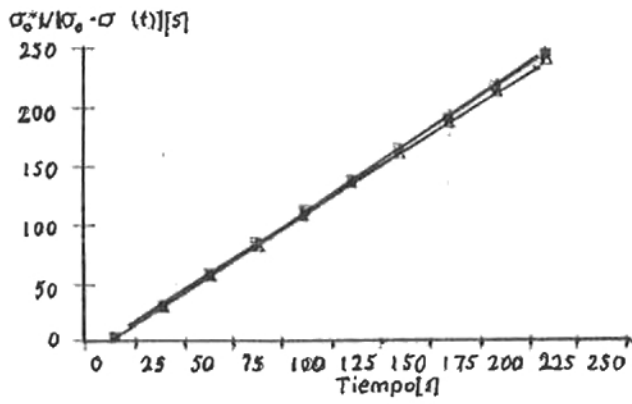
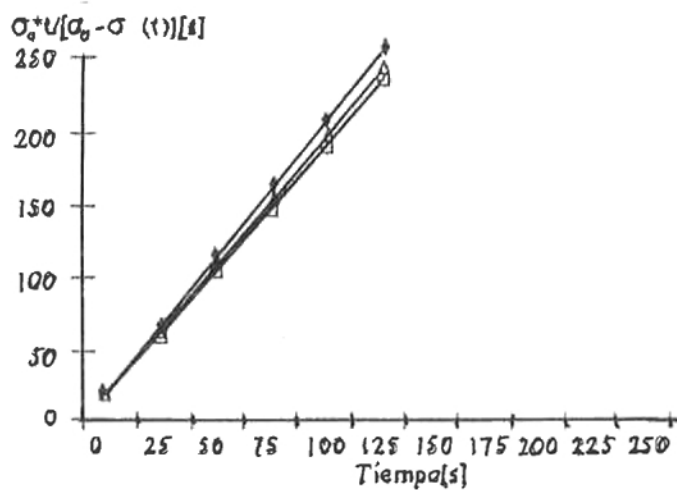
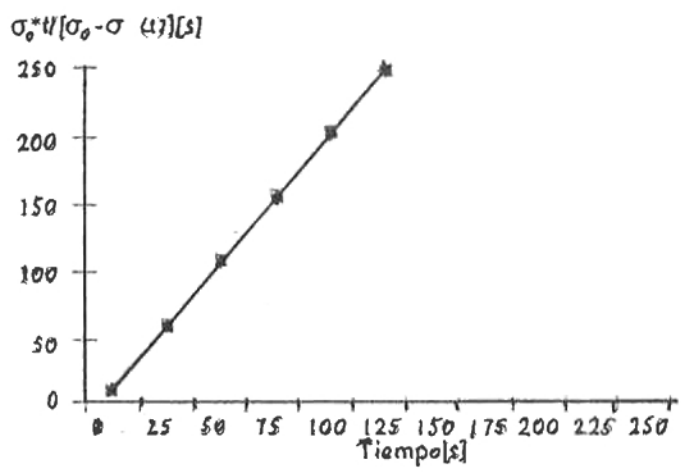


Fig. 56: Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienas a 28°C, altura inicial 9 mm (Castro, 1995).



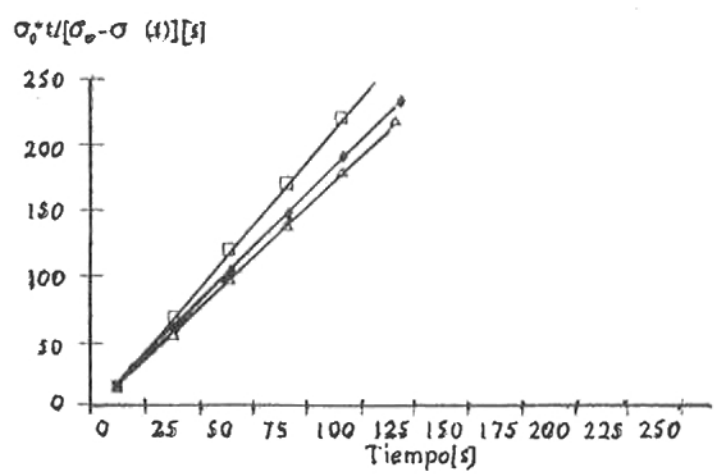
Formulación A

- Vienesas Vacuno T=18°C
- ▲— Vienesas Pavo T=15°C
- ◆— Vienesas Equino T=17°C



Formulación B

- Vienesas Vacuno T=18°C
- ▲— Vienesas Pavo T=15°C
- ◆— Vienesas Equino T=17°C



Formulación C

- Vienesas Vacuno T=18°C
- ▲— Vienesas Pavo T=15°C
- ◆— Vienesas Equino T=17°C

Fig. 57: Linealización de Peleg para tres formulaciones de pasta de vienesas, altura inicial 20 mm (Castro, 1995).

Otra forma de presentar las curvas de relajación es según Finkowski y Peleg (1981).

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

donde :

F_0 es la fuerza inicial

$F(t)$ es la fuerza al tiempo t

k_1 y k_2 son constantes que indican lo siguiente.

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 $\frac{[F_0 - F(t)]}{F_0}$ y también representa

la parte del esfuerzo que se relajaría después de un largo tiempo.

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

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

donde :

A es el área de la muestra perpendicular a la fuerza.

ε es la deformación.

En el caso de los sólidos sometidos a relajación se cumple:

$$E(t) = E_0 + f_1(t)$$

donde :

$E(t)$ es el módulo de relajación al tiempo t .

E_0 es el módulo de relajación en el equilibrio.

$f_1(t)$ es la función de relajación que a $t = \infty$, $f_1(t) \longrightarrow 0$

Pollak y Peleg (1980) y Finkowski y Peleg (1981) demostraron que E_A es una función de la deformación de alimentos, 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 $E(t) = f_2(t)$

donde :

$E(t)$ es el módulo de relajación al tiempo t .

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

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

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

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

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

E_A no es un verdadero valor de E_0 que representa el módulo a tiempo infinito.

En este 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 nos encontraríamos frente a un problema.

Peleg y Pollak (1982) plantean el siguiente camino a seguir:

Se compara el estudio realmente medido después de 5 a 10 minutos con los valores asintóticos calculados con 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 se estudia 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.

Si 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 es debido 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.

Debido a las variaciones de área que se producen en las muestras sometidas a ensayos de compresión, es adecuado transformar las curvas fuerza-tiempo o fuerza-deformación en curvas esfuerzo real v/s deformación real.

El término módulo de deformabilidad ha sido sugerido por Mohsenin y Mittal (1977) para reemplazar el módulo de Young, que se aplica principalmente a deformaciones pequeñas.

En el caso del módulo de deformabilidad, éste representa la resistencia total del material a la deformación, ya sean deformaciones permanentes o deformaciones dependientes de la velocidad, ya sean pequeñas o grandes.

Alimentos esponjosos

Para alimentos esponjosos (Peleg *et al.*, 1989) sometidos a ensayos de compresión dan curvas de forma característica.

En materiales esponjosos Ashby, citado por Peleg *et al.* (1989), estudió los efectos de la longitud de la pared celular, espesor y esfuerzo en la deformabilidad y rotura 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.

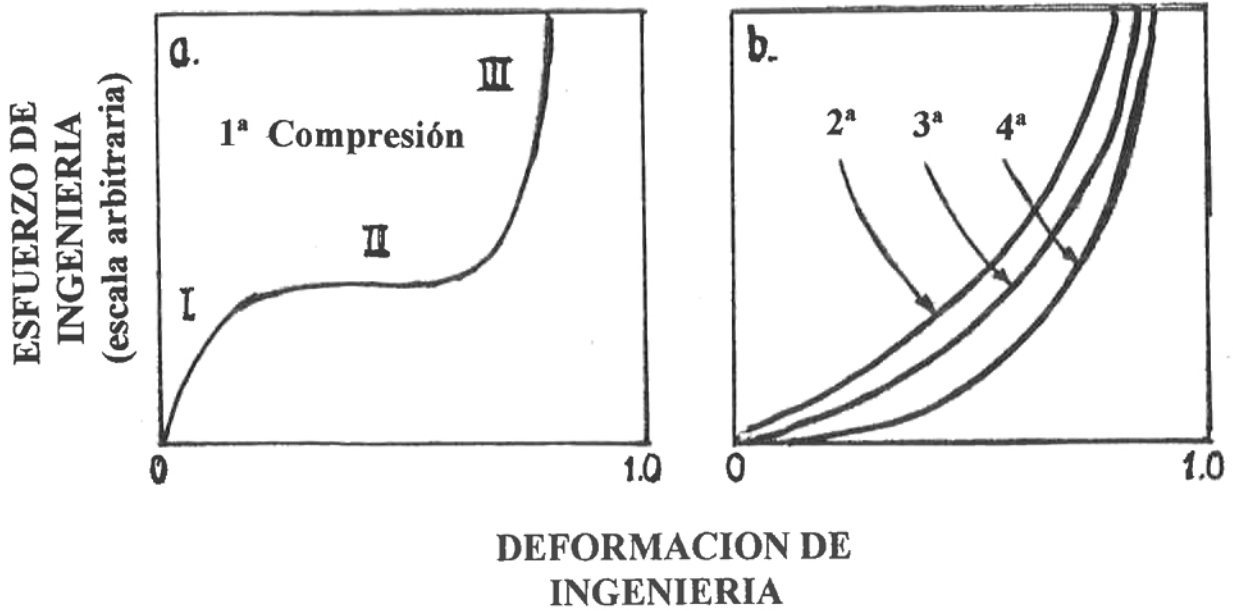


Fig. 58: Esquema de la forma típica de la curva esfuerzo de compresión v/s deformación para alimentos esponjosos (Peleg *et al.*, 1989).

En la figura 58 el gráfico a:

a) Curva para la primera compresión

Zona I representa deformación de la matriz original

Zona II colapso de las paredes celulares

Zona III densificación

y el gráfico b:

b) Curva típica para varias compresiones.

(nótese que desaparece el hombro).

La curva presenta tres zonas: la primera deformación elástica o casi elástica debido a la flexión de las paredes celulares, seguida por colapso y aplastamiento de las paredes celulares, fluencia o rotura y compactación al aplastarse las paredes celulares.

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 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 v/s deformación puede ser descrita por

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

donde :

σ : esfuerzo de ingeniería

ε : deformación de ingeniería, deformación absoluta dividida por la altura inicial de la muestra. Ya que el área transversal no aumenta frecuentemente en la compresión.

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

C_2 : constante que es un índice de forma que alrededor de la unidad revela cuan fuerte es el hombro (ver figura).

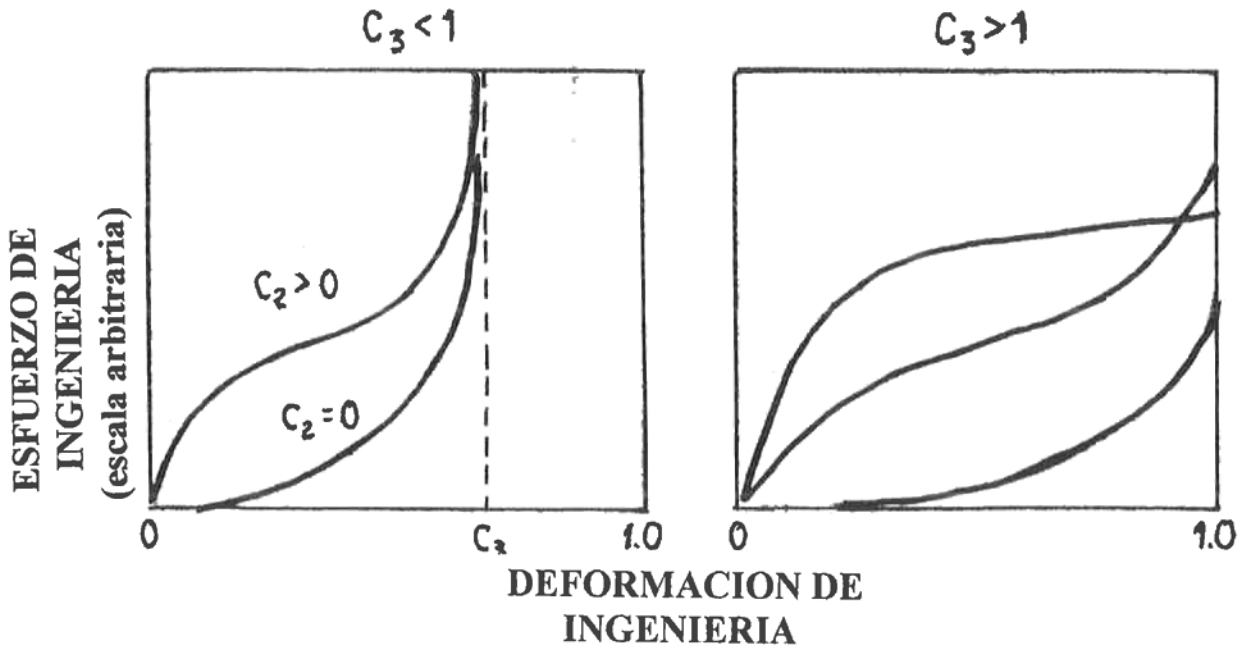


Fig. 59: Esquema que muestra los efectos de la magnitud C_1 , C_2 y C_3 en las curvas esfuerzo-deformación (Peleg *et al.*, 1989).

La forma exacta del hombro está determinada por C_2 y C_3 (ver figura).

Al ser $C_2 = 0$, la ecuación anterior queda:

$$\sigma = \frac{C_1 \varepsilon}{C_3 - \varepsilon}$$

que es una relación monótonicamente ascendente sin hombro, tal como se ve en la fig. 58b.

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

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

Si también sucede $C_3 \gg 1 > \varepsilon$, el esfuerzo presenta un plateau importante al nivel de $C_1 / C_2 C_3$. 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 densificación 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 fig. 59, pero esto no tiene significado físico.

En el caso de 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, y son cóncavas hacia arriba.

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

donde :

F es la fuerza

ΔH la deformación

K y n constantes

Swyngedau *et al.* (1991) hacen el análisis siguiente del modelo para curvas fuerza-deformación cóncavas.

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

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:

Esto se representa por: $\Delta H_F = \Delta H_T (T)$

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

donde :

- ΔH_T es la deformación total del arreglo analizado.
- ΔH_1 es la deformación de la capa 1.
- ΔH_2 es la 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 de 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 : espesor de la capa.

a y c : constantes.

La constante a tiene dimensión de la fuerza, y la constante c tiene dimensión de longitud.

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

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

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

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

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 :

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

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 *et al.* (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.

Kaletung *et al.* (1992) plantean una revisión del concepto de elasticidad; que es la propiedad de un objeto de volver a sus medidas originales después de sufrir una deformación. De acuerdo a esto, no se podría hablar de un material sólo con la curva fuerza-deformación o esfuerzo-deformación unitaria, habría que considerar otros aspectos.

Así Mohsenin (1986) plantea que la medida de la elasticidad sería la razón entre la deformación recuperable y el total en ciclo compresión descompresión, que no es fácil medir en los gráficos correspondientes.

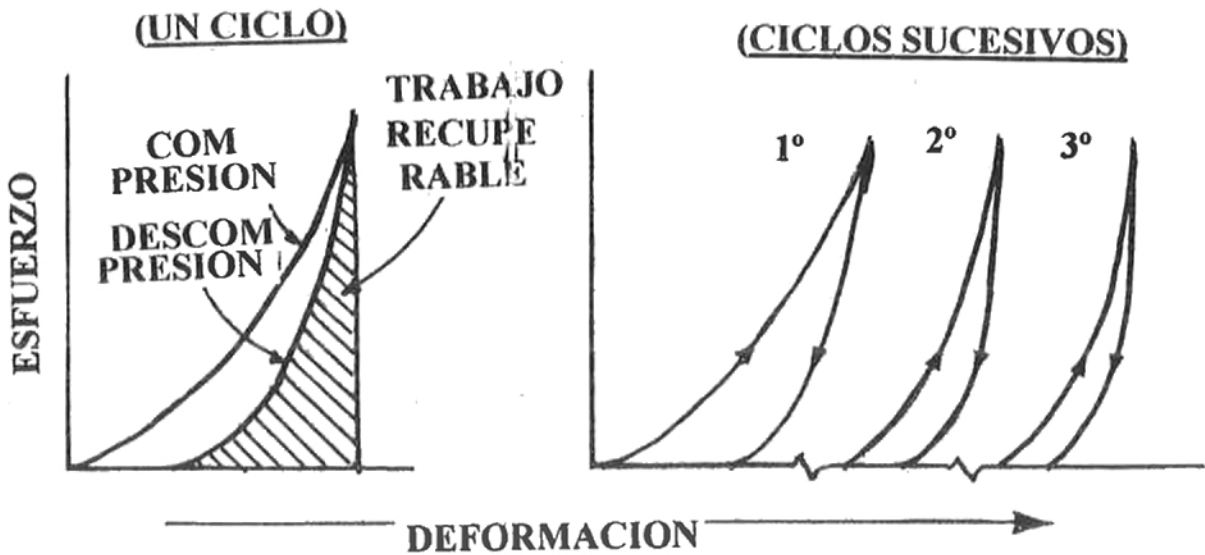


Fig. 60: Esquema de la relación esfuerzo-deformación de marshmallows en ciclos de compresión descompresión sucesivos (Lee *et al.*, 1983).

Okku y Sherman (1979) plantean que una medida más viable es la razón entre el trabajo recuperable y el total (fig. 60).

El módulo de deformabilidad M , según Johnson *et al.* (1980) es definido como :

$$M = \sigma_T / \varepsilon_T$$

donde :

σ_T : esfuerzo real

ε_T : deformación real

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

$$\sigma_T = F(t) / A(t)$$

donde :

$F(t)$ es la fuerza a tiempo t

$A(t)$ es el área real a tiempo t

y

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

donde :

A_0 : área original

H_0 : altura original

ΔH : deformación absoluta

Luego

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

y la deformación real en la compresión es:

$$\varepsilon_T = \ln \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H} \right)$$

El grado de elasticidad (degree of elasticity) que está basado en una razón de trabajo puede ser determinada en una serie de ciclos de compresión y descompresión (Kaletung *et al.*, 1991).

Estos mismos investigadores han determinado que en geles el grado de elasticidad en cuatro ciclos es afectado en forma no significativa por el número de ciclos.

En el caso de quesos (alimentos plásticos) el grado de elasticidad cambia significativamente como resultado de los cambios estructurales (Kaletung *et al.*, 1991).

O sea que el área bajo la curva de compresión es el trabajo total por unidad de volumen, mientras que el área bajo la curva de descompresión es el trabajo por unidad de volumen.

Al realizar el análisis de los datos de porcentaje de trabajo recuperable v/s porcentaje de deformación Kaletung *et al.* (1992) para ensayos con mashmallows encontraron que a bajo porcentaje de deformación habían diferencias mayores en porcentaje de trabajo recuperable, tal como en el caso de pan al realizar cuatro ciclos sucesivos de compresión ya sea que la muestra descansa 30 o 60 segundos.

Los cálculos realizados fueron según las ec.:

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

y

$$\varepsilon_H(t) = \text{Ln} \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H(t)} \right)$$

donde:

F (t) es la fuerza aplicada en función del tiempo t.

ΔH (t) : deformación absoluta al tiempo t.

A_0 : es el área original.

H_0 : longitud original.

σ_{cor} (t) : esfuerzo corregido.

ε_H (t) : deformación de Hencky.

El valor real medio del módulo de deformabilidad depende de las condiciones del ensayo y en especial de las medidas de la muestra y de la velocidad del ensayo. Si estos efectos son secundarios en magnitud en la realización del ensayo, el valor del módulo será de utilidad en la caracterización del producto alimenticio.

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:

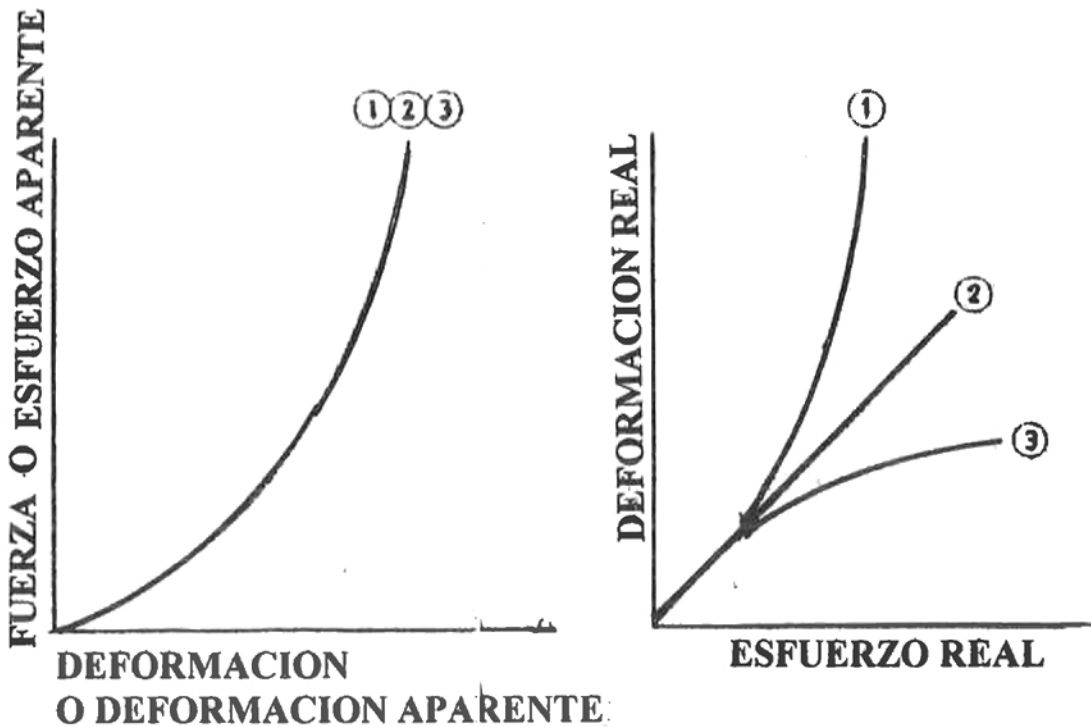


Fig. 61: Representación esquemática de las diferencias entre las curvas fuerza v/s deformación y las curvas esfuerzo real v/s deformación real (Johnson *et al.*, 1980).

Johnson *et al.* (1980) plantean que al aplicarlo a filete de pescado obtienen la curva siguiente:

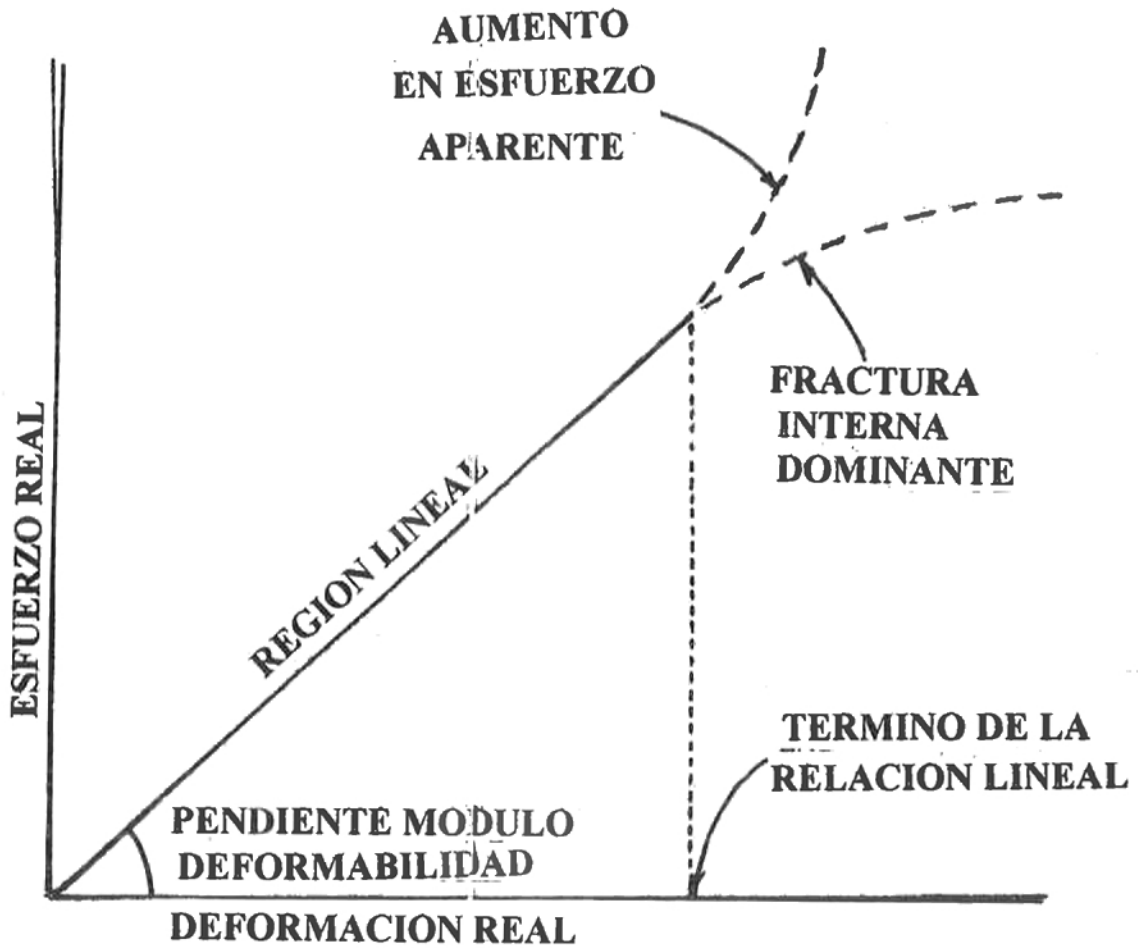


Fig. 62: Caracterización mecánica de filete de pescado por medio de la curva esfuerzo real v/s deformación real (Johnson *et al.*, 1980).

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, esto indica que hay rotura interna.

Las curvas curva 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. Estos casos son indistinguibles en los casos fuerza v/s deformación.

En el caso de concavidad hacia abajo se produce desintegración del material, y en el caso de concavidad hacia arriba se produce un arreglo interno.

Este caso también se representa en la situación de las pasas deshidratadas osmóticamente, y pasas sin deshidratado osmótico (papas secadas en forma convencional) (Castro *et al.*, 1997).

Las curvas de esfuerzo real versus deformación real presentan concavidad hacia abajo.

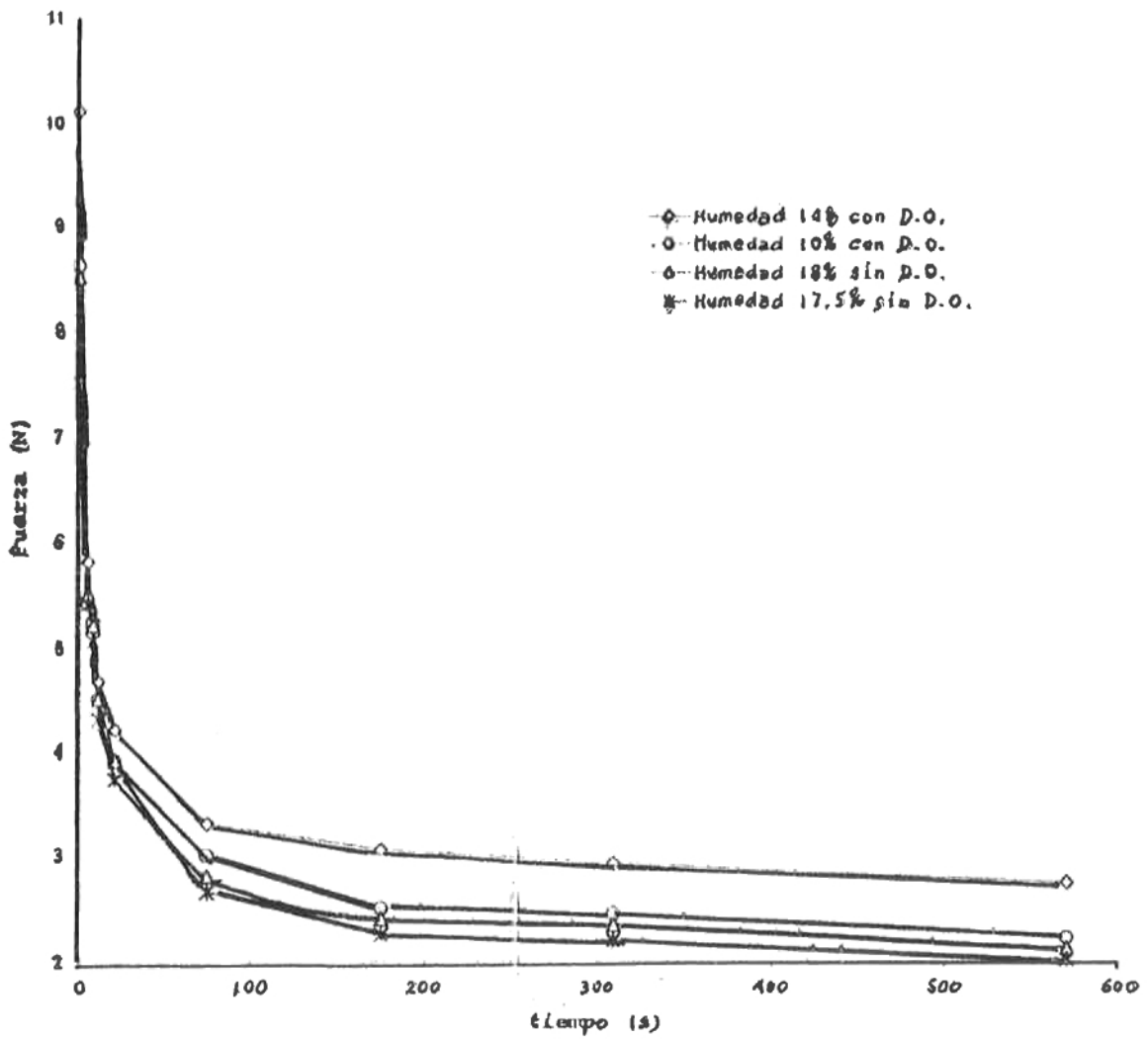


Fig. 63: Curvas de relajación de pastas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) con diferentes humedades y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro *et al.*, 1997).

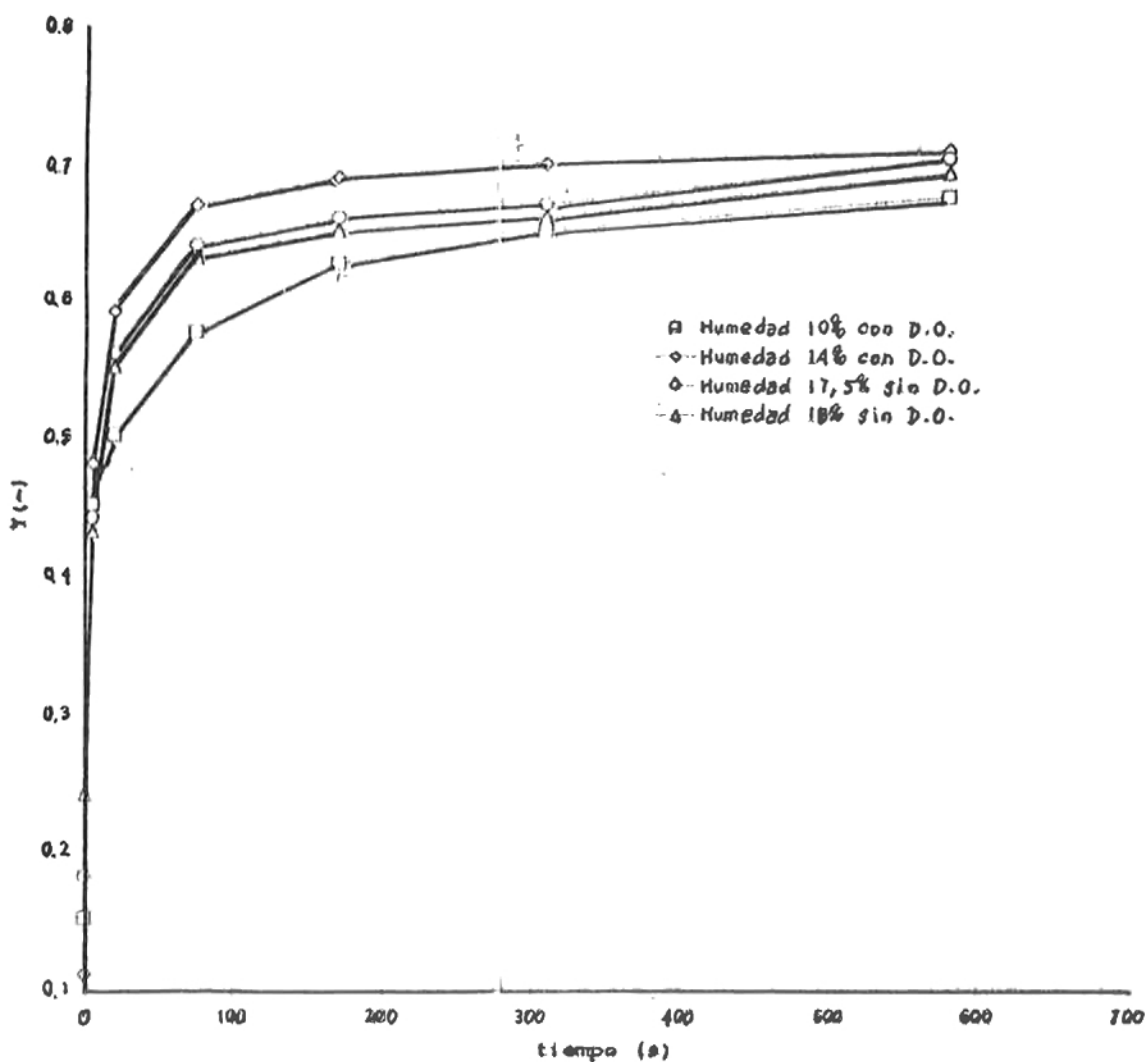


Fig. 64: Curvas de relajación normalizadas de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro *et al.*, 1997).

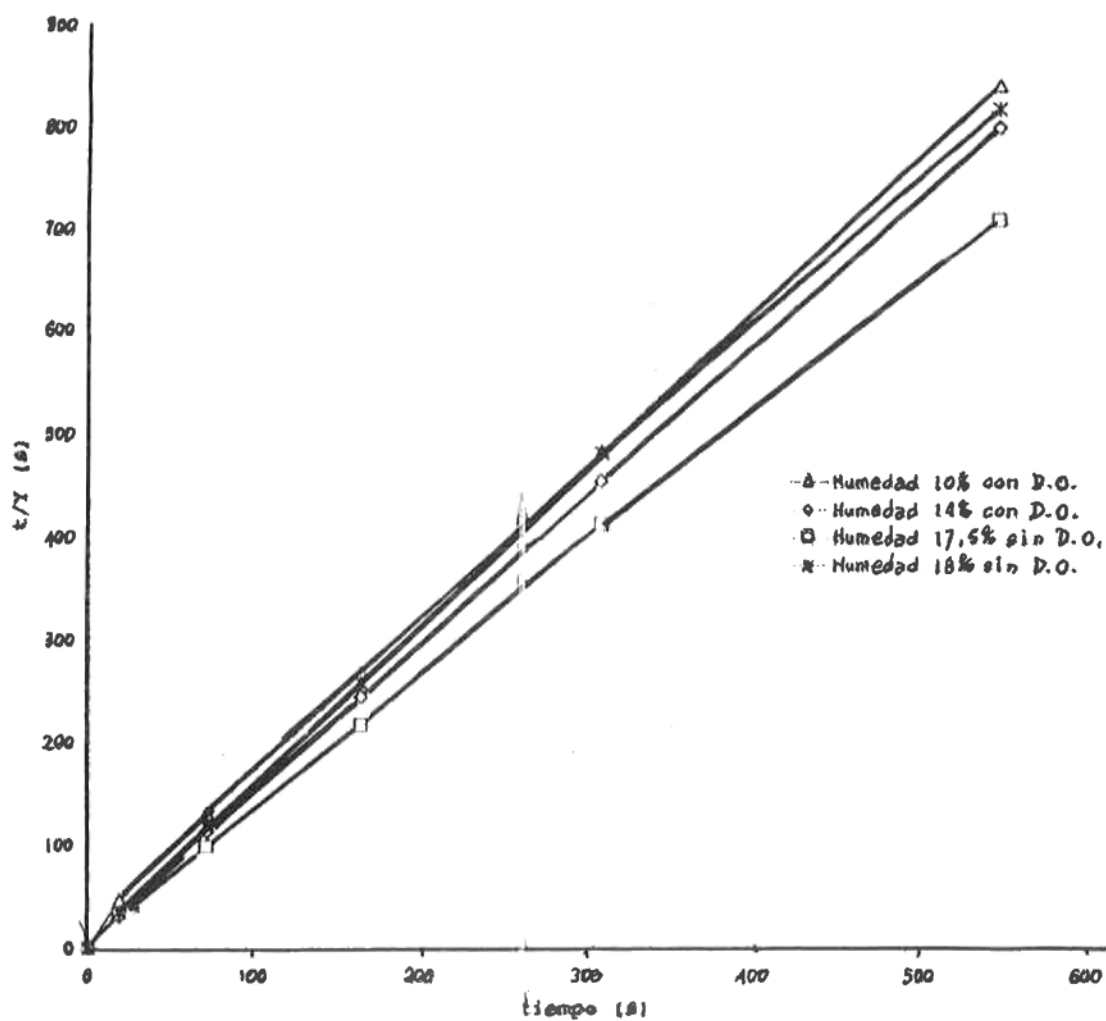


Fig. 65: Curvas de relajación linealizadas de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro *et al.*, 1997).

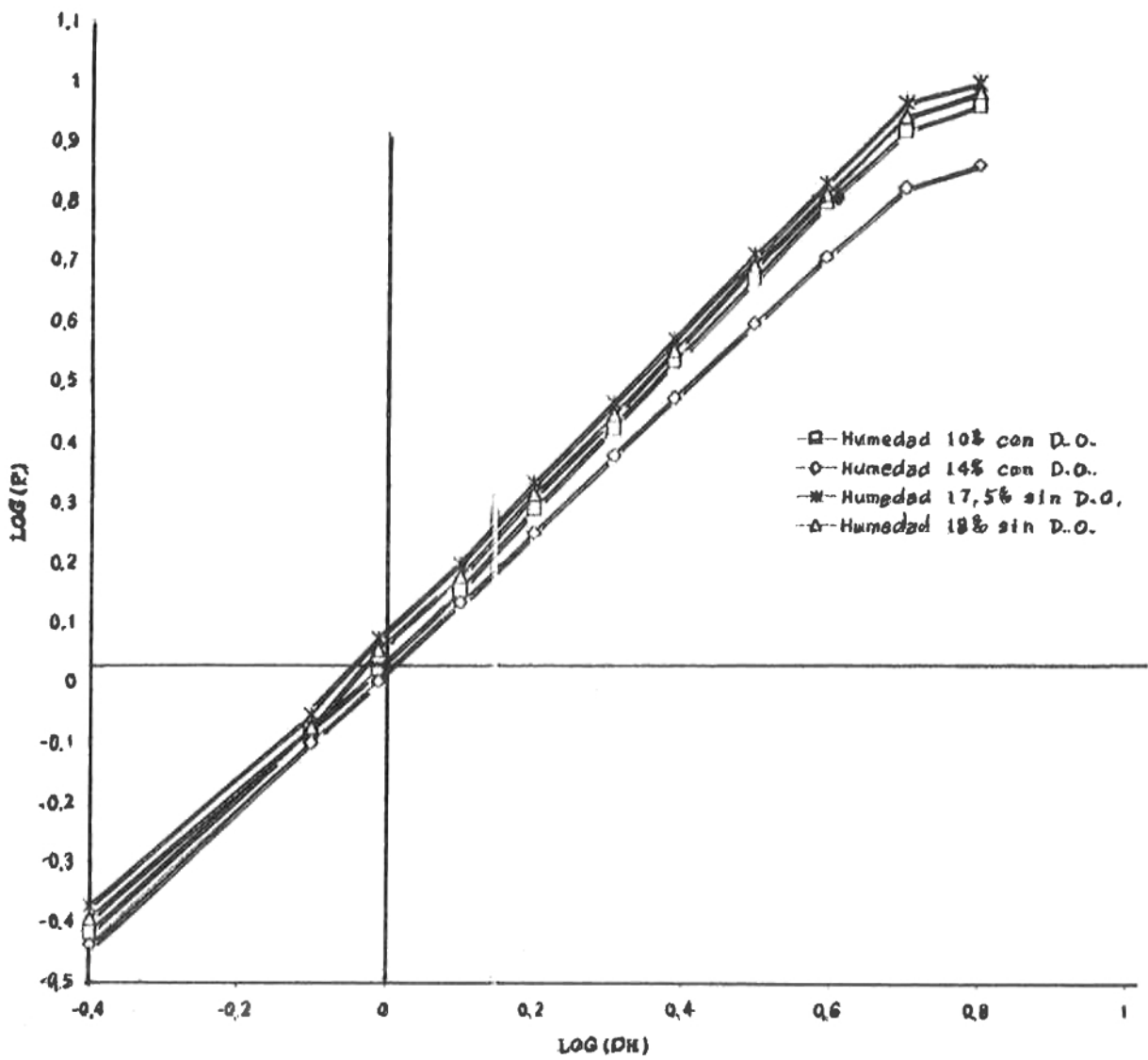


Fig. 66: Modelo tipo Ley de la Potencia de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratado osmótico (sin D.O.) (Castro *et al.*, 1997).

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

Las curvas $\log F$ versus $\log \Delta H$ siguen un modelo tipo potencia y son cóncavas hacia abajo (Castro *et al.*, 1997).

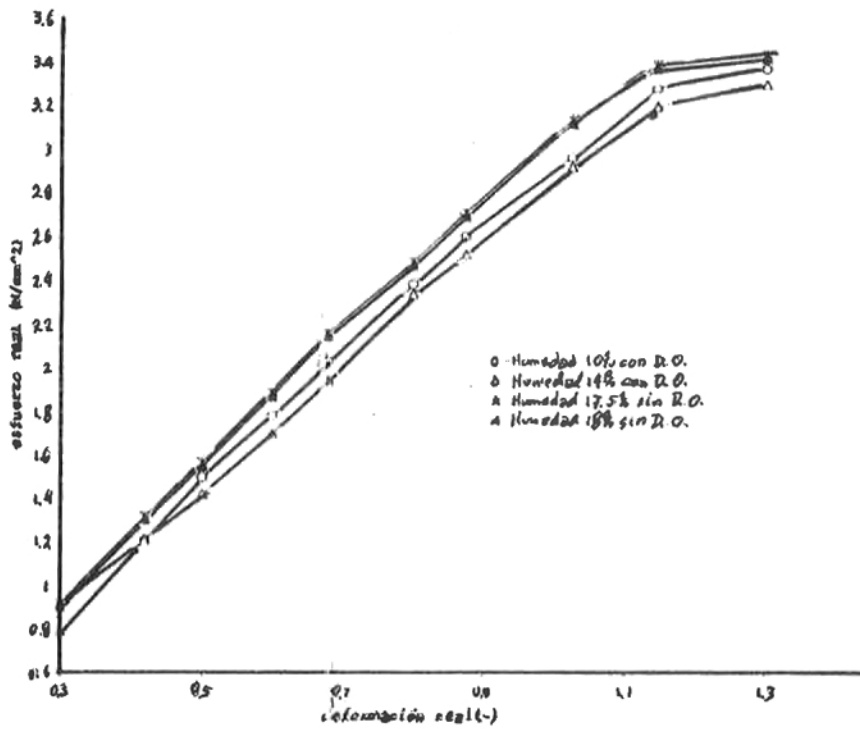


Fig. 67: Curvas esfuerzo v/s deformación real de pasas deshidratadas osmóticamente (con D.O.) y de pasas sin deshidratadas osmóticamente (sin D.O.) (Castro *et al.*, 1997).

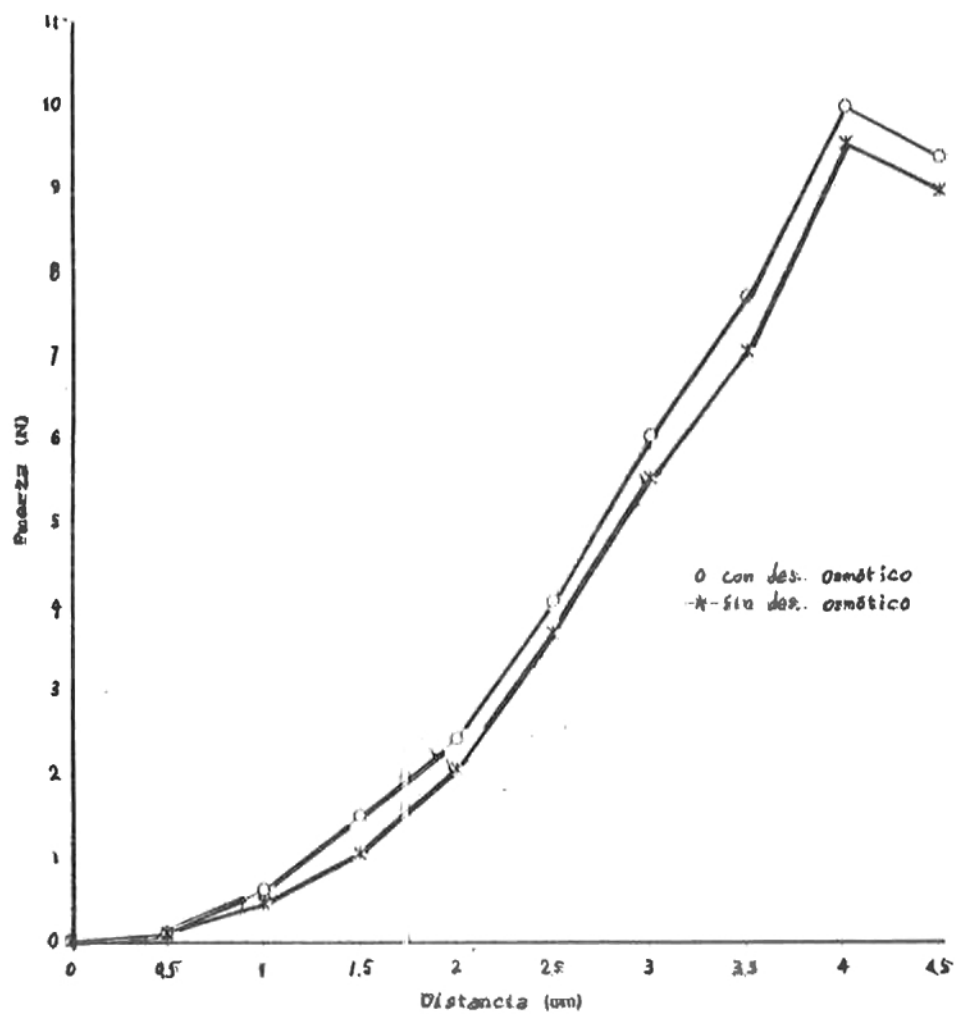


Fig. 68: Curvas de compresión de pasas deshidratadas osmóticamente y pasas sin deshidratado osmótico (humedad 18%) (Castro *et al.*, 1997).

Ensayos texturales de geles

Generalmente se habla de elasticidad de los geles y se tiene que recordar que significa el término.

Elasticidad es la habilidad del objeto para volver a sus medidas originales al desaparecer la fuerza que provoca la deformación.

También hay que recordar que el único cuerpo totalmente elástico es el Hookeano, y en alimentos este caso en la realidad no se presenta ya que mayoritariamente son viscoelásticos o viscoelásticos-plásticos, especialmente al estar sujetos a deformaciones grandes.

En los ensayos realizados y si se alcanza el límite de rotura el cuerpo se recupera, pero no a sus medidas originales como se muestra en la figura 69.

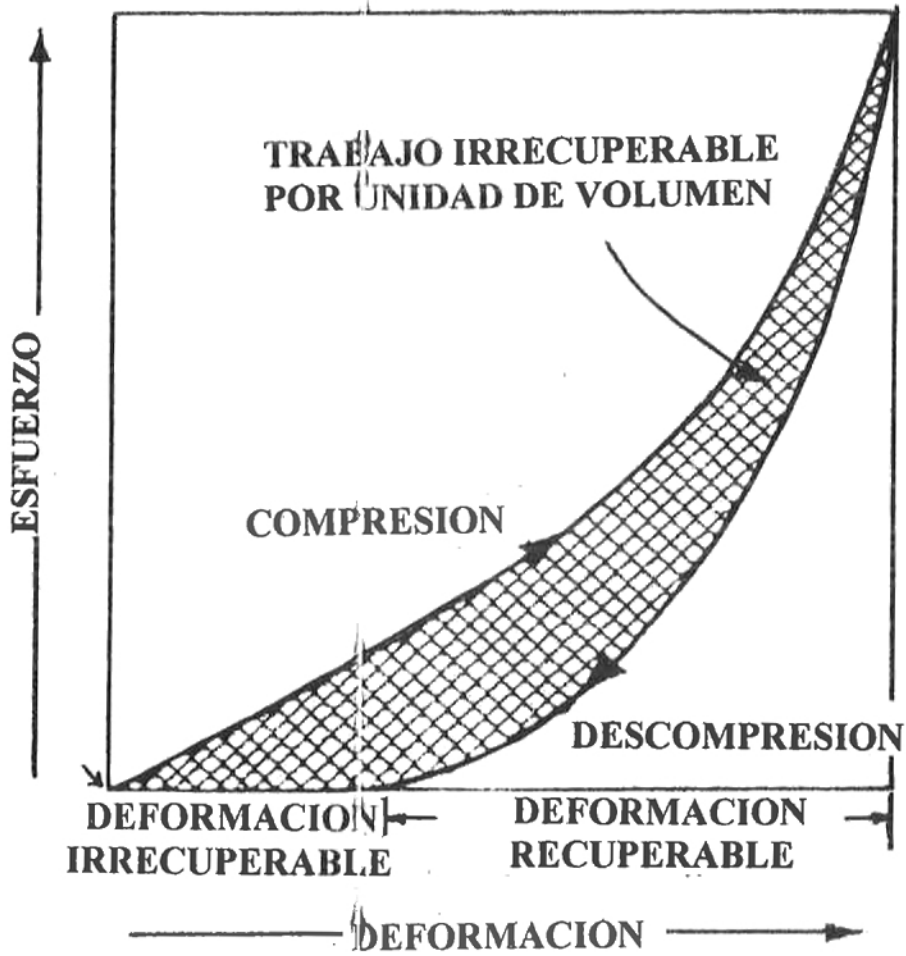


Fig. 69: Representación esquemática de la relación esfuerzo-deformación en un ciclo de compresión-descompresión (Kaletúng *et al.*, 1991).

Y puede suceder que el cuerpo recupere sus medidas originales y una parte considerable del trabajo mecánico es recuperable.

Al someter una muestra a ciclos de compresión-descompresión, el trabajo total por unidad de volumen es representado por el área bajo la curva de compresión en el gráfico esfuerzo-deformación, y el trabajo recuperable es el área bajo la curva de descompresión y el trabajo irre recuperable es el área encerrada por el loop de histéresis.

El grado de elasticidad puede ser expresado como la razón entre la deformación recuperable o irre recuperable y la deformación total. Pero la deformación recuperable es muy difícil de medir y puede provocar un error grande.

Si la recuperación es retardada el error es más grande.

Una alternativa es presentar el grado de elasticidad en función del trabajo recuperable o irre recuperable y el trabajo, el error disminuye debido a que el área es más precisa de evaluar.

Existe otra dificultad, es que la cantidad de trabajo recuperable o irre recuperable o deformación puede depender del nivel de deformación a que es sometido el objeto en estudio. Esta dependencia en si misma puede llegar a ser una propiedad del material en estudio y esto podría servir como indicador de los cambios estructurales a que la muestra es sometida.

También hay que tener presente que el material elástico tiene la propiedad de recuperar su forma en ciclos de deformación repetidos.

En los geles las propiedades son informadas en términos de módulo esfuerzo de ruptura, deformación de ruptura, módulo dinámico y parámetros de relajación y creep.

Kaletung *et al.* (1991 b) plantean que el trabajo total y el irreversible permanecieron más o menos iguales en cinco ciclos a deformaciones hasta 30%.

Ya que la parte de trabajo irre recuperable puede ser considerado como una medida de elasticidad, los geles de agar, alginatos y carrageninas pierden elasticidad al aumentar el nivel de deformación.

Kaletung *et al.* (1991 b) plantean que para medir elasticidad de geles deben hacerse análisis del efecto de la velocidad y realizar pruebas complementarias, tales como ensayos dinámicos, relajación o creep.

Ensayos de relajación y creep

Las propiedades mecánicas pueden cambiar en un tiempo corto de los alimentos, debido a que ellos son materiales biológicamente o químicamente activos.

Esta característica de los alimentos impone una limitación severa en las pruebas de relajación y creep, que requiere de tiempos más largos y en esos tiempos se puede producir cambios importantes.

A la vez no hay que olvidar que los modelos teóricos están basados en un comportamiento viscoelástico verdadero, por ejemplo si es sólido viscoelástico verdadero se presenta un esfuerzo de equilibrio (residual) después de la relajación y también podría presentar una deformación de equilibrio (finita) después de un tiempo largo de ensayo de creep.

Si se trata de un líquido viscoelástico por ejemplo, en todos los esfuerzos se deluyen en la relajación y la muestra fluye continuamente en creep sin alcanzar una deformación constante.

Estas situaciones se presentan en los materiales viscoelásticos independiente de que ellos sean considerados lineales o no con la restricción de que no cambian de sólido a líquido (o de líquido a sólido) después de serles aplicados un esfuerzo o una deformación, no hay que olvidar los cambios físico-químicos, microbiológicos o enzimáticos.

Esto puede hacer dudar de la validez de los ensayos y resultados obtenidos. Pero Purkayastha y Peleg (1986) presentaron evidencias que hay una concordancia entre los resultados del equilibrio de ensayos de relajación y creep, y estos son originados por las características reológicas de los materiales utilizados.

Los autores Purkayastha y Peleg (1986) presentan un esquema de los experimentos de deformación y relajación (ver figura).

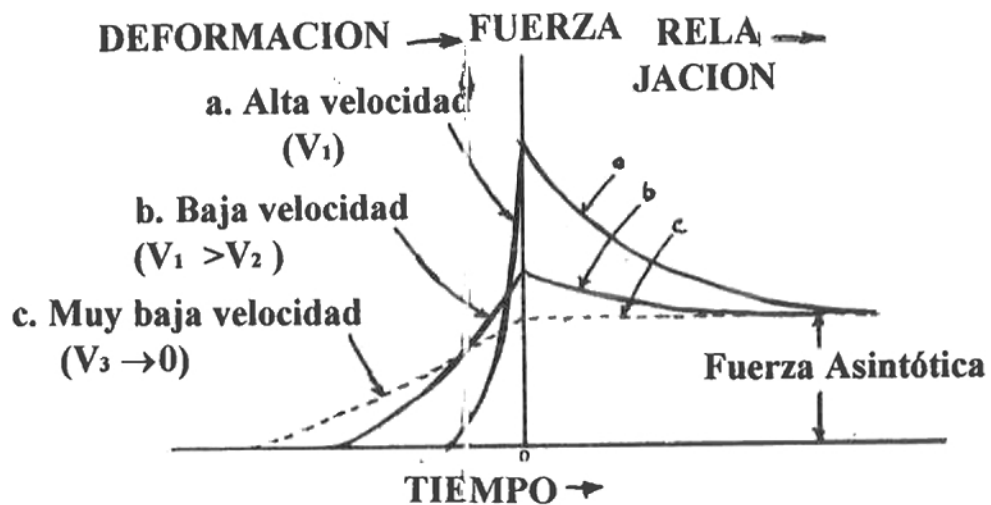


Fig. 70: Representación esquemática de experimentos de deformación y relajación (V es la velocidad de deformación). Nótese que un sólido viscoelástico se deforma a velocidad muy baja y casi no se relaja (Purkayastha y Peleg, 1986).

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

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

donde:

σ_0 : es el esfuerzo inicial corregido por el cambio de área.

k_2 : es la 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 de gel agar se cumple que la razón del esfuerzo asintótico y esfuerzo inicial (o módulos) tienen una fuerte dependencia de la deformación.

Ensayos de creep

Purkayastha y Peleg (1986) calcularon el creep compliance corregido, $J(t)$ como la deformación dividida por el esfuerzo corregido por el área de la muestra en expansión sin olvidar que en creep de compresión el esfuerzo está disminuyendo en forma continua (ver figura).

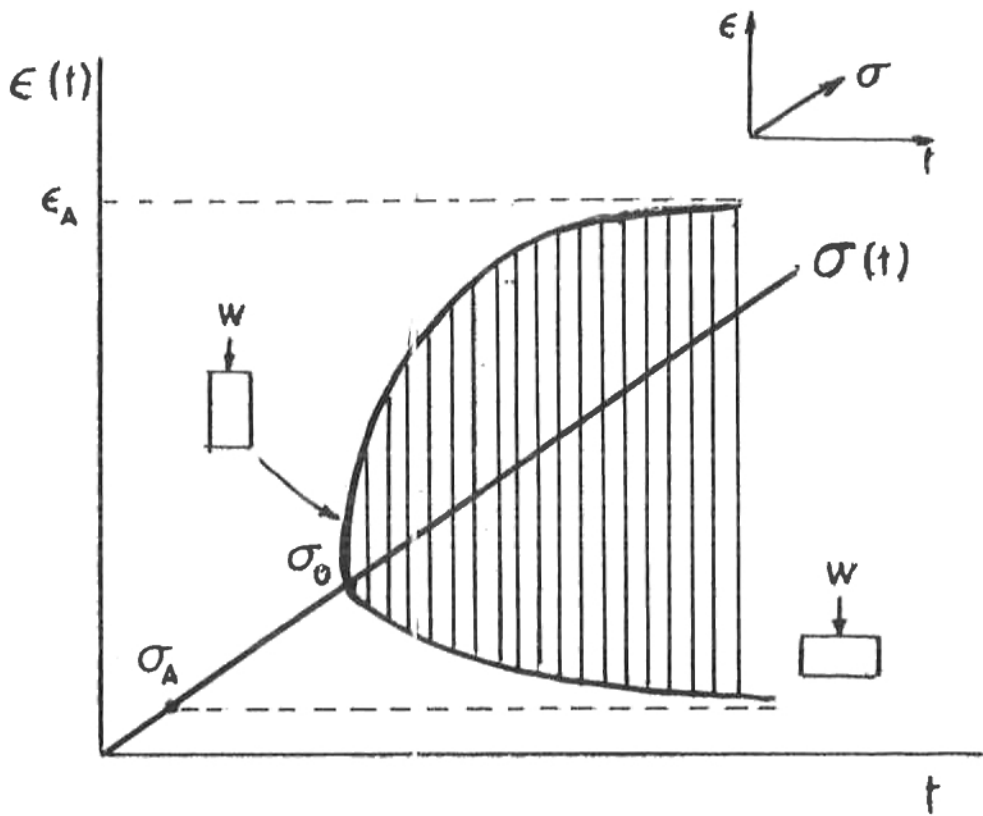


Fig. 71: Esquema de la progresión de un ensayo de creep y la forma en que la deformación asintótica y compliance asintótico fueron calculados por Purkayastha y Peleg (1986).

Para calcular la compliance asintótico, la curva de creep-compliance fue ajustada con el modelo siguiente (Purkayastha *et al.*, 1985), utilizando técnicas de regresión no lineal.

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

donde las k_0 , k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son constantes al hacer tender el tiempo a infinito.

Cuando $t \rightarrow \infty$

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

y la compliance asintótica (J_A) fue calculado como

$$J_A = k_0 + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_4}$$

El modelo asintótico, por definición, es el recíproco de la compliance en función de la deformación de Henky.

Al realizar estas curvas, los investigadores Purkayastha y Peleg (1986) encontraron que los módulos asintóticos calculados en creep tienen la misma magnitud de los calculados en los ensayos de relajación.

Así plantean que a deformaciones grandes, los datos de creep no pueden ser utilizados para predecir el comportamiento en relajación y tampoco los de relajación para predecir el comportamiento de creep.

En los ensayos con queso cheddar y gel de agar, el módulo disminuye progresivamente con la deformación en los ensayos de creep, esta situación no se presenta en el caso de la papa.

En la papa, se podría presentar un módulo asintótico o compliance algo constante.

Esfuerzo y deformación en muestras sometidas a torsión

Los ensayos se realizan aplicando la carga torsional en ambos extremos de la muestra y el esfuerzo de corte (τ) máximo y la deformación en cizalla se producen en la parte de menor reacción de la muestra que es donde se produce la falla. En ese lugar (Tang *et al*, 1994) el esfuerzo de cizalla máximo (τ_{\max}) y la deformación en cizalla máximo (γ_{\max}) se calcula de :

$$\tau_{\max} = \frac{2 KM}{\pi r_{\min}^3}$$

$$\gamma_{\max} = \frac{2 K \phi_s}{\pi r_{\min}^3 Q_s}$$

donde:

M: momento torsión.

r_{\min} : radio mínimo de la muestra.

ϕ_s : deformación angular del sector curvado.

K y Q_s : son constantes que dependen de la geometría del sistema.

Los extremos de la muestra no producen efectos en el esfuerzo de falla, pero su deformación contribuye a la deformación total que sufre la muestra.

Suponiendo que los extremos mantienen la forma cilíndrica de radio r_{end} y longitud total l_{end} , la deformación angular cumple

$$\phi_{\text{end}} = \frac{MQ_{\text{end}}}{G}$$

donde:

G es el módulo de cizalla.

$$y \quad Q_{\text{end}} = \frac{l_{\text{end}}}{\pi r_{\text{end}}^4}$$

La deformación angular total observada ϕ_t es:

$$\phi_t = \phi_s + \phi_{end} = \frac{M}{G} (Q_{end} + Q_s)$$

y
$$\frac{\phi_s}{\phi_t} = \frac{Q_s}{Q_s + Q_{end}}$$

reemplazando Q_{end} , queda

$$\phi_s = \frac{Q_s}{Q_s + \frac{L_{end}}{\pi r_{end}^4}} \phi_t$$

y al sustituirlo en la ecuación de γ ésta queda

$$\gamma_{max} = \frac{2 K \phi_t}{\pi r_{min}^3 Q_s} K'$$

donde $K' = \frac{1}{1 + \frac{L_{end}}{\pi r_{end}^4 Q_s}}$

K' es el factor de corrección por los efectos finales y varía entre 0 y 1, dependiendo de las magnitudes L_{end} y r_{end} y del factor de Q_s .

De acuerdo a los esfuerzos y deformaciones del círculo de Mohr un amago de torsión genera cizalla, compresión y tracción en que los valores son:

$$\sigma_{max} = \sigma_{true\ max} = \tau_{max}$$

y la deformación normal vale:

$$\epsilon_{max} = \frac{\tau_{max}}{2}$$

y la deformación real normal es:

$$\epsilon_{\text{true max}} = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\gamma_{\text{max}}^2}{2} + \gamma_{\text{max}} \left(1 + \frac{\gamma_{\text{max}}^2}{4} \right)^{1/2} \right)$$

En los casos de ensayo de compresión donde las superficies de contacto están lubricadas. Los valores de la deformación real normal es :

$$\epsilon_{\text{true max}} = - \ln \left(1 - \frac{\Delta L_{\text{max}}}{L} \right)$$

y el esfuerzo para geles incompresibles es:

$$\sigma_{\text{true max}} = \frac{F_{\text{max}}(L - \Delta L_{\text{max}})}{\pi R^2 L}$$

donde F_{max} es la fuerza de compresión en el momento de falla y ΔL_{max} es la deformación correspondiente, R y L son las medidas originales de la muestra cilíndrica.

En el caso de tracción para este tipo de muestras se planteará lo siguiente: si la altura de los extremos de la muestra es reducida a un décimo de la longitud total de la unidad, los efectos de los extremos son despreciables.

Y el esfuerzo normal verdadero y la deformación normal verdadero se calculan con:

$$\epsilon_{\text{true max}} = \ln \left(1 + \frac{\Delta L_{\text{max}}}{L} \right)$$

$$\sigma_{\text{true max}} = \frac{F_{\text{max}}(L + \Delta L_{\text{max}})}{\pi R^2 L}$$

En los conos de compresión y tracción, el esfuerzo verdadero de corte y la deformación verdadero de corte son:

$$\tau_{\text{true max}} = \frac{\tau_{\text{true max}}}{2}$$

$$\gamma_{\text{true max}} = \epsilon_{\text{true max}} (1 + \nu)$$

En que ν es la razón de Poisson y que vale 0,5 para la mayor parte de los alimentos (Tang *et al.*, 1994)

Curvas de relajación de geles

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

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

que sería el tipo de modelo de Maxwell

donde

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

a_i coeficientes

τ_i tiempo de relajación.

En estos casos Nussinovitch *et al.*, (1989) plantean que en la mayoría de los casos bastaría con tres o cuatro términos para describir las curvas experimentales 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 $t \rightarrow \infty$, 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. O sea que el comportamiento del gel (en tiempos cortos) es equivalente al de un sólido viscoelástico, con un módulo residual de magnitud a_0 (Nussinovitch *et al.*, 1989).

Además, del punto de vista del cálculo de las constantes de la ecuación, que generalmente se realiza para que ajuste de curvas, que realmente dependen del tiempo de ensayo, las 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

$$E(t) = b_1 \exp\left[-\left(\frac{t}{100}\right)\right] + b_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{10}\right)\right] + \dots + b_4 \exp\left[-\left(\frac{t}{0.1}\right)\right] + \dots$$

donde b son los coeficientes que son los que varían.

También, este modelo ha sido propuesto para medir el comportamiento de sólidos y Miller *et al.* (1986) demostraron que modelos con dos o tres términos podrían explicar el comportamiento de los alimentos al estudiar la curva de relajación.

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:

$$\frac{F(t)}{F_0} = 1 - \frac{t}{k_1 + k_2 t}$$

o en la linealización de Peleg

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

Luego un módulo asintótico puede ser determinado mediante

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

donde:

A es el área de la muestra

ε es la deformación.

y la velocidad instantánea de relajación es :

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

donde la velocidad inicial de relajación es $1 / k_1$

Se define el módulo de deformabilidad con:

$$E_d = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon H(t)}$$

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

y

$$\varepsilon H(t) = \text{Ln} \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H(t)} \right)$$

Vida util

Los ensayos texturales son excelentes para determinar la vida útil, ya que estas propiedades van cambiando en el tiempo de vida de producto.

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 de compresión se realizaron en una máquina para ensayos de materiales Lloyd LR – 5K, utilizando una celda Kramer 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 ΔH es la deformación real.

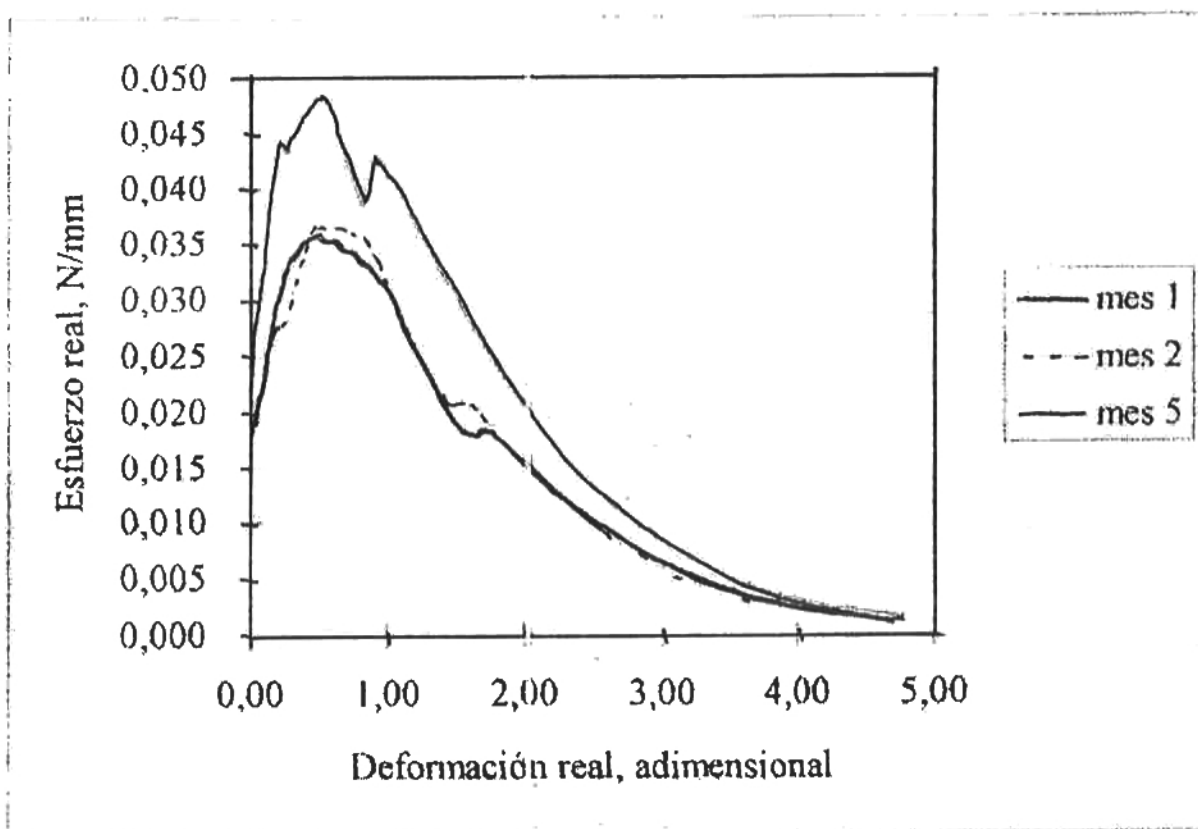


Fig. 72: Curva de esfuerzo real v/s deformación real para la masa rollo a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).



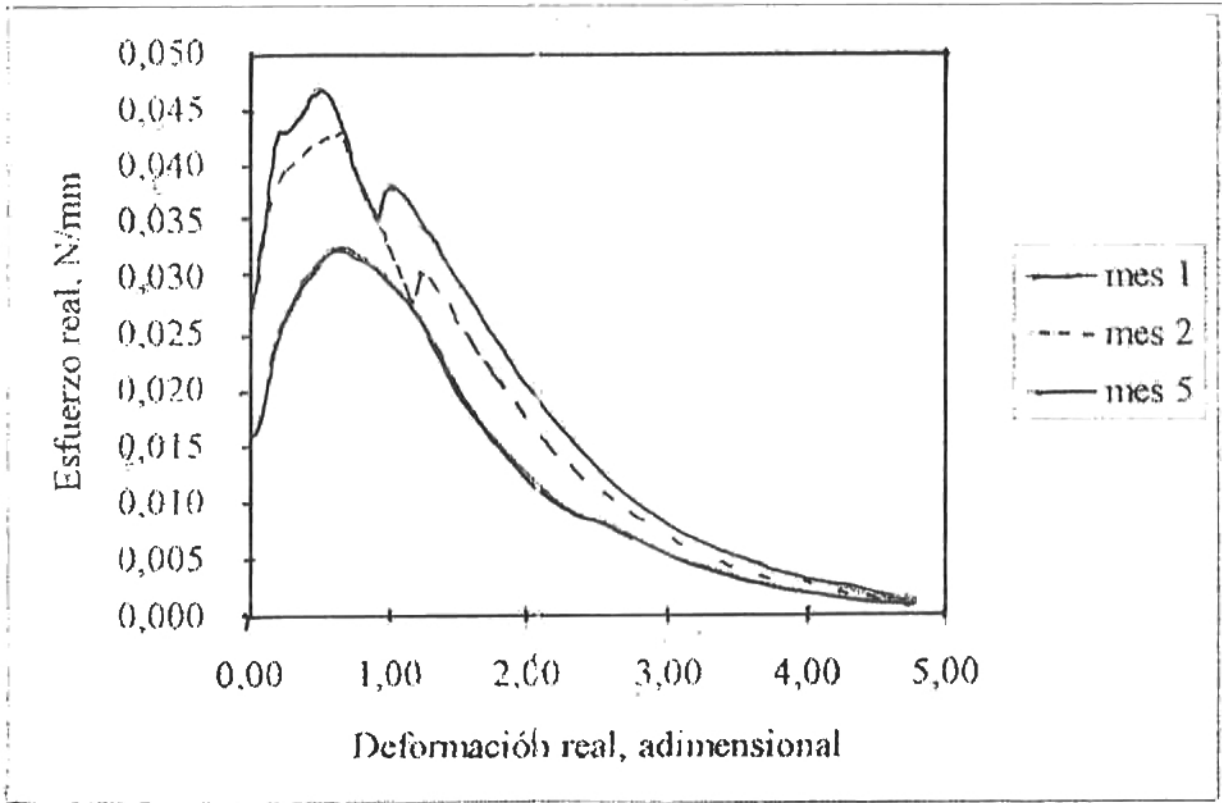


Fig. 73: Curva de esfuerzo real v/s deformación real para la masa fruta a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).

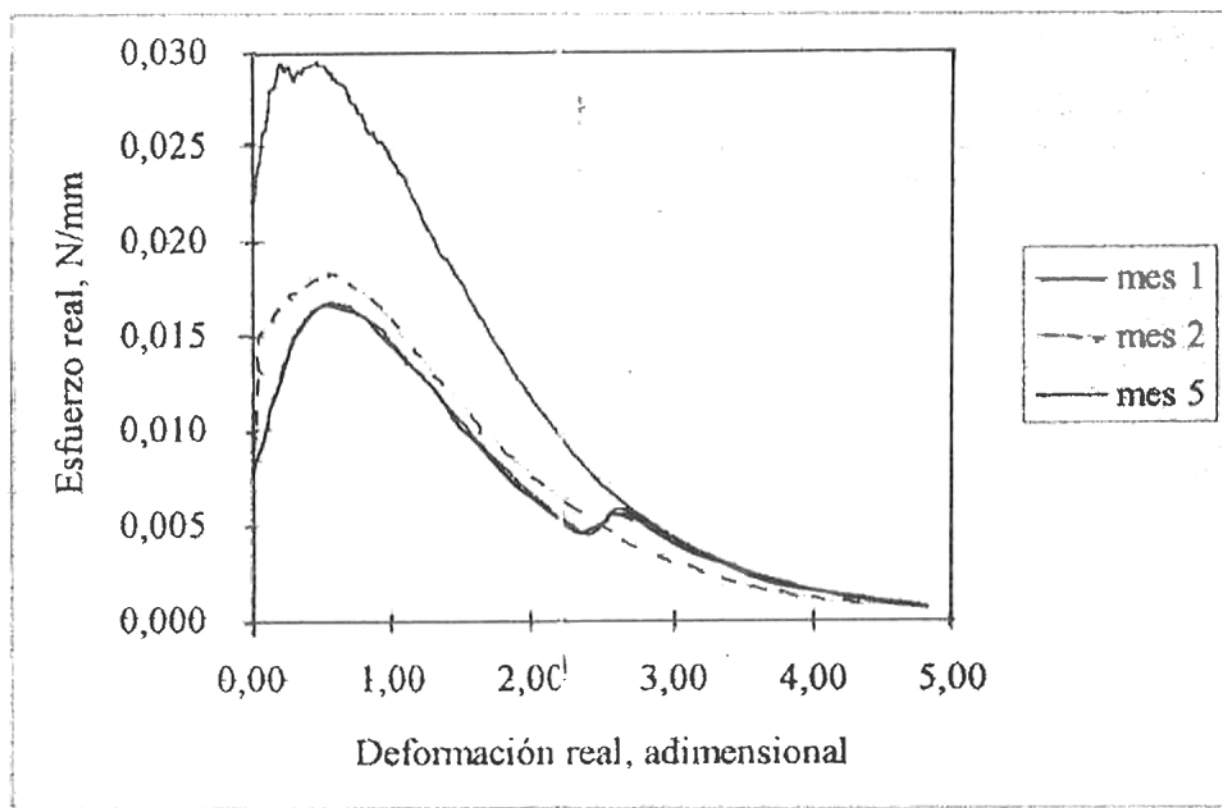


Fig. 74: Curva de esfuerzo real v/s deformación real para la masa orange a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).

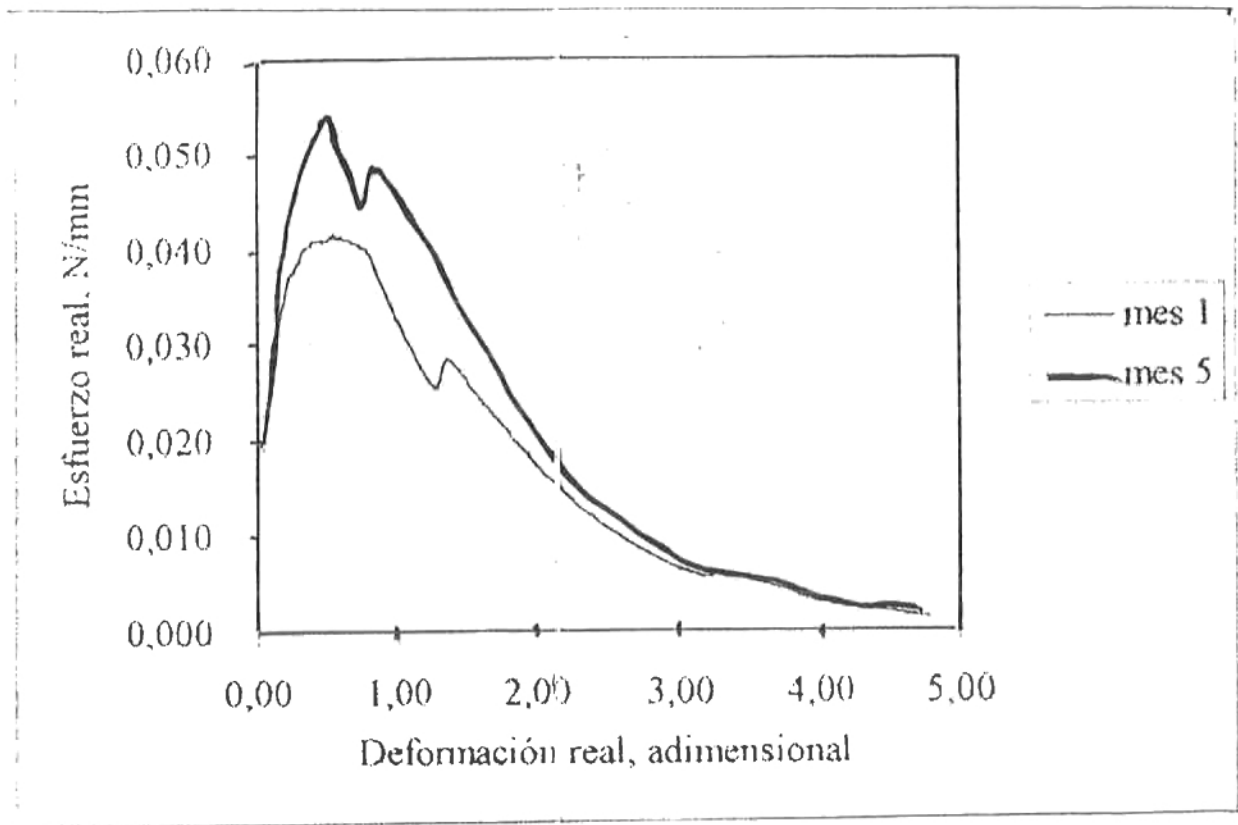


Fig. 75: Curva de esfuerzo real v/s deformación real para las frutas terminadas a distintos tiempos de almacenamiento (Hagger, 1997).

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.

Flujo comprimido o flujo por compresión (Squeezing flow)

Flujo comprimido o por compresión es el flujo perpendicular a la fuerza de compresión que lo produce.

El material se coloca entre dos discos, el inferior es el fijo y el superior es móvil la fuerza de compresión se aplica a la blaca superior.

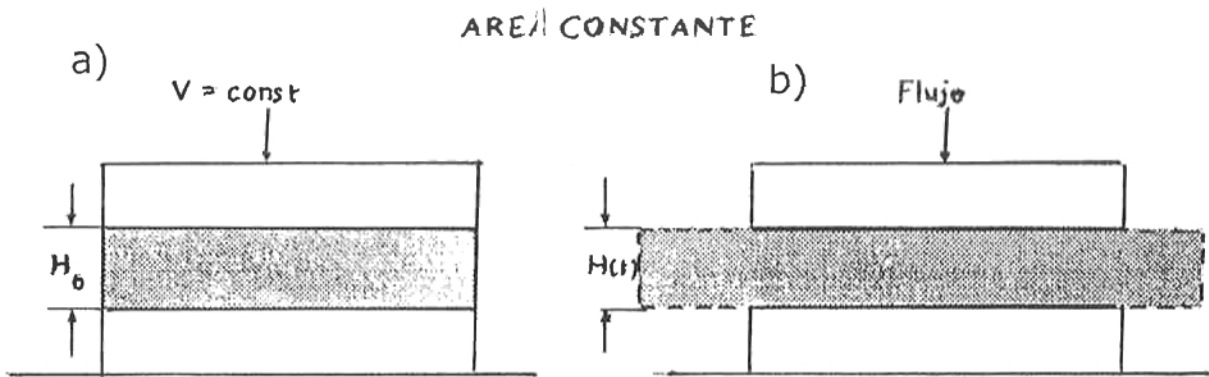


Fig. 76: Esquema de flujo comprimido a velocidad de deformación constante y área constante.

El caso a) es en el instante inicial ($t = 0$) no se ha producido flujo de material, y en el caso b) la fuerza de compresión ya ha actuado (tiempo t cualquiera) y el material está fluyendo entre las placas.

Las experiencias se pueden realizar a velocidad constante de desplazamiento de la placa superior o aplicando fuerza constante a la placa superior durante su desplazamiento.

También, el volumen de la muestra puede ser constante o puede ser con área constante de los discos.

Esta situación está representada en la figura siguiente:

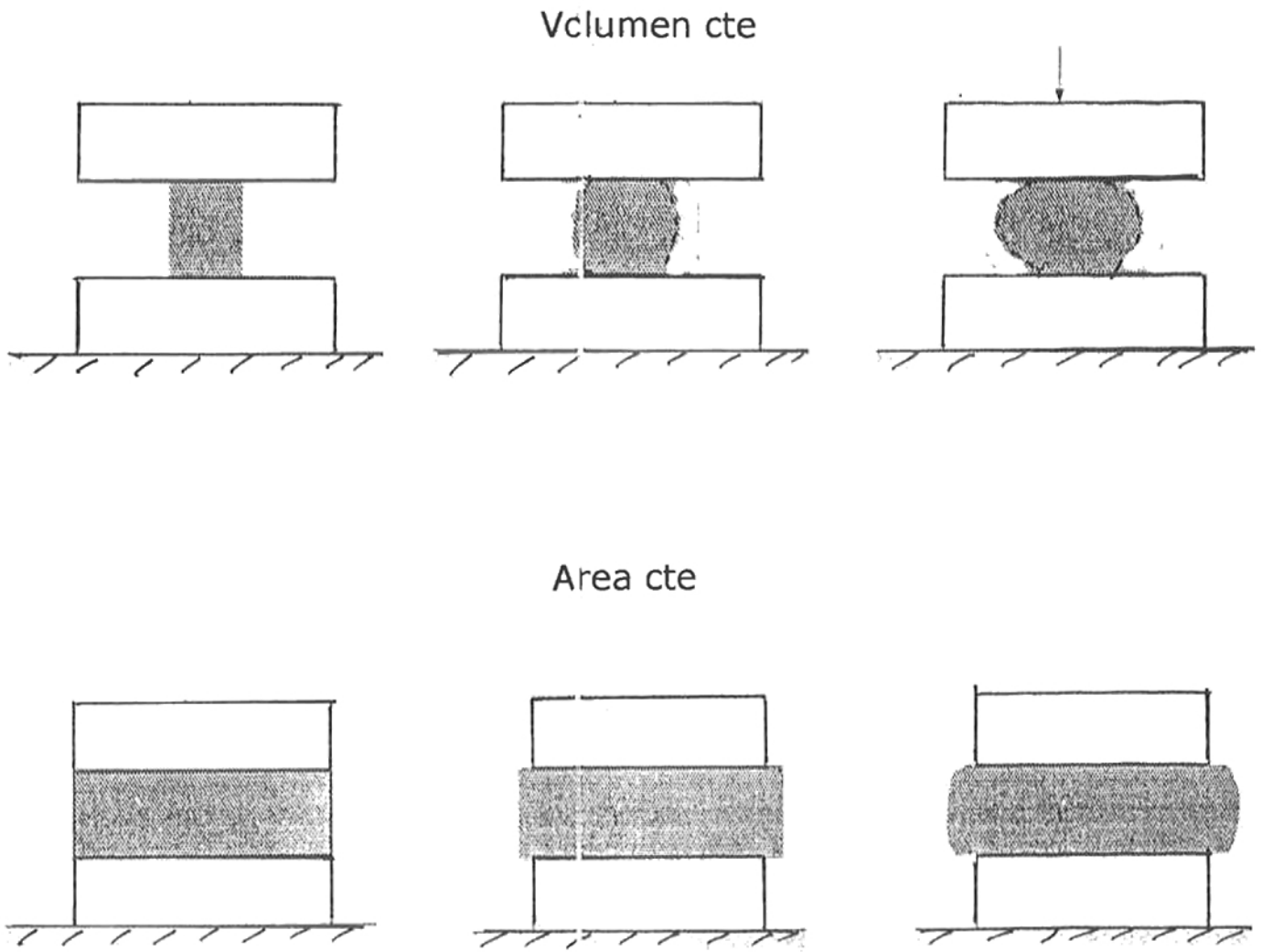


Fig. 77: Esquema de flujo comprimido a volumen constante y área constante.

Los productos alimenticios generalmente pueden tener contenido alto o bajo de grasas, esto se traduce en que esta grasa puede lubricar las placas donde está la muestra siendo sometida a ensayo.

Por eso, teóricamente se han considerado las situaciones siguientes:

- i) Con lubricación de las placas.
- ii) Sin lubricación de las placas.

i) Flujo comprimido con lubricación de las placas.

Leider y Bird (1974) hicieron un desarrollo teórico del flujo comprimido considerando el caso de dos discos lubricados de radio R y $2 h_0$ es la separación de los discos con la muestra para un fluido en que la viscosidad cumple la ley tipo potencia.

$t_{1/2}$ es el tiempo necesario para la separación de los discos sea la mitad de la inicial $2 h_0$ o sea, $h/h_0 = 1/2$.

El análisis teórico se basa en el balance de masa, ecuación de momentum y ecuación reológica.

i) balance de masa.

$$-\dot{h} \pi r^2 = 2 \pi r \int_0^h v_r dz$$

donde $-\dot{h} = -dh/dt$ que es la velocidad de descenso del disco superior.

r : coordenada radial.

v_r : velocidad radial.

z : coordenada axial medida desde el plano medio entre los discos.

ii) Ecuación de momentum.

Se utiliza el componente según la dirección r y todos demás términos son despreciados.

$$\frac{\delta \tau_{rz}}{\delta z} = - \frac{\delta P}{\delta r}$$

donde $\delta \tau_{rz}$: componente del flujo momento, dina/cm²

P : presión, dina/cm²

iii) Ecuación reología

El único tensor considerado es:

$$\tau_{rz} = - m \left| \frac{\delta v_r}{\delta z} \right|^{n-1} \frac{\delta v_r}{\delta z} = m \left(- \frac{\delta v_r}{\delta z} \right)^n$$

el efecto $\frac{\delta v_r}{\delta r}$ es despreciable y la función viscosidad sólo depende de $\frac{\delta v_r}{\delta z}$

donde m, n : parámetros ley de la potencia.

De la resolución de las ecuaciones anteriores se llega a:

$$F = \frac{(-h)^n}{h^{2n+1}} \left(\frac{2n+1}{2n} \right)^n \frac{\Pi m R^{n+3}}{n+3}$$

se puede aplicar a fluido newtoniano considerando n = 1 y m = μ (viscosidad del fluido)

Al integrarla se obtiene:

$$\frac{t^{1/2}}{n} = K^n \left(\frac{\Pi m R^2}{F} \right) \left(\frac{R}{h_0} \right)^{1+1/n}$$

donde:

$$K^n = \left(\frac{2^{1+1/n} - 1}{2n} \right) \left(\frac{2n + 1}{n+1} \right) \left(\frac{1}{n+3} \right)^{1/n}$$

Si pueden determinar los parámetros del fluido a partir de las medidas de tiempo medio ($t^{1/2}$).

Leider (1974) plantea lo siguiente:

Se dibuja Fh_0/R^3 versus $(R/h_0)/t^{1/2}$ en coordenadas logarítmicas que en la parte lineal permite determinar n y m de la ecuación

$$m = \left(\frac{t^{1/2}}{R/h_0} \right)^n \left(\frac{Fh_0}{R^3} \right) \frac{1}{\Pi^n \eta^n k_n^n}$$

en que

η : viscosidad $\text{g cm}^{-1} \text{s}$

Si el fluido es inelástico (o sea tiene tiempo de relajación (λ) pequeño) bastaría con dos puntos para obtener los parámetros.

Según Leider (1974) el valor de λ se obtiene de:

$$\lambda = \frac{m}{2m} \left(\frac{1}{n} \right)^{1/n - n}$$

m y n se obtienen al aplicar ley tipo potencia a los datos de viscosidad versus $\dot{\gamma}$

$$\eta = m (\dot{\gamma})^{1/n - 1}$$

y para los parámetros m' y n' se obtienen al aplicar ley de la potencia a la curva

N_1 (esfuerzo unitario) versus $\dot{\gamma}$ (velocidad de deformación).

Al estar presente los efectos elásticos se deben obtener varios valores para la curva $\frac{Fh_0}{R^3}$ versus $\frac{R}{h_0 t^{1/2}}$ logrando situaciones como los de la figura siguiente

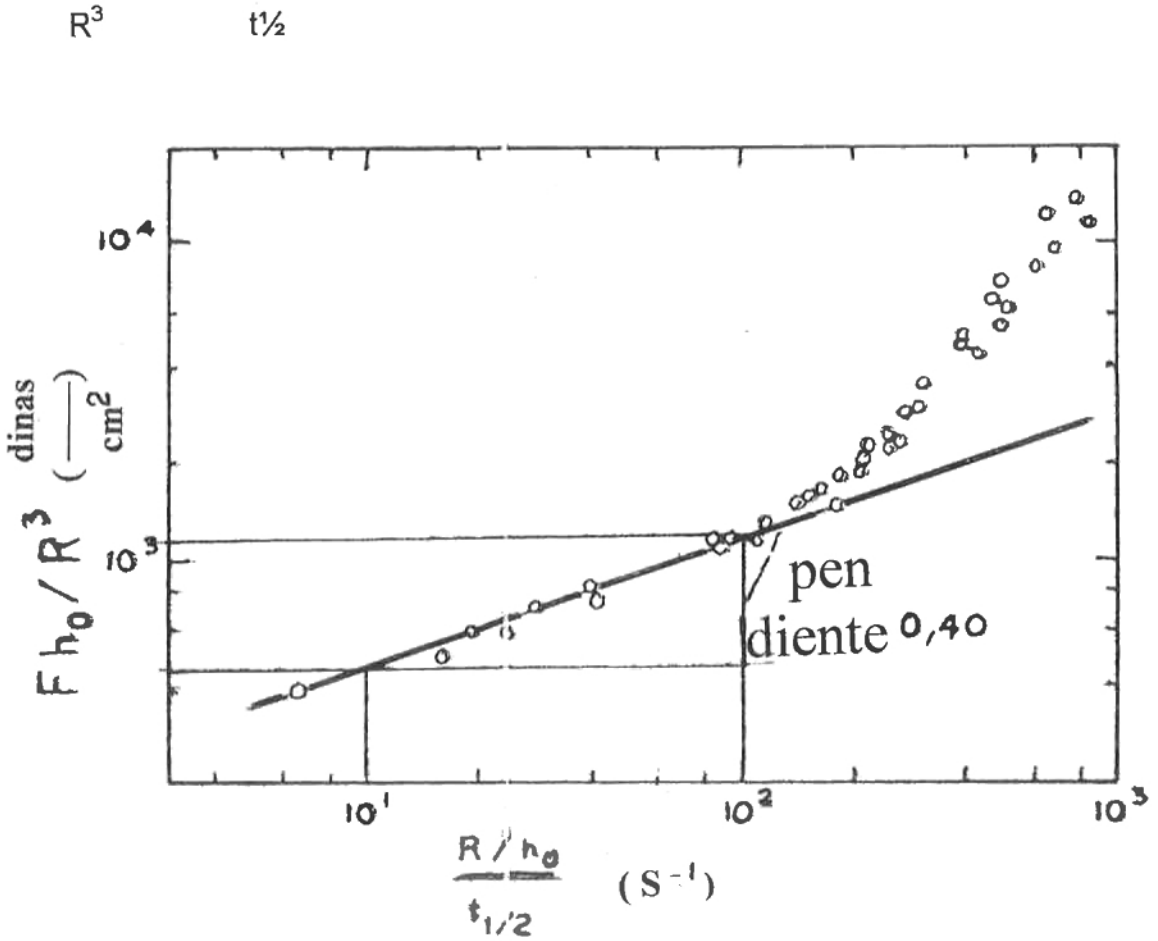


Fig. 78: Determinación de los parámetros de la ley de la potencia para Separan; n es determinado de la pendiente y m de la ecuación anteriormente vista (Leider, 1974).

Matthew y Bruce (1983) establecieron la ecuación general siguiente:

$$F = \frac{(-\dot{h})^n}{h^{2n+1}} \left(\frac{2n+1}{2n} \right)^n \frac{\Pi m F \lambda^{n+3}}{n+3} + \frac{(-\dot{h})^{n'}}{h^{2n'}} \left(\frac{2n+1}{2n} \right)^{n'} \frac{\Pi m' R^{n'+2}}{n'+2}$$

Si los efectos elásticos son despreciables ($m' = 0$) desaparece el segundo término y la ecuación es la ya vista.

Esta ecuación predice que un fluido viscoelástico fluirá más lento en flujo comprimido que un fluido viscoelástico con la misma función de viscosidad.

Esto es para fluidos que cumplen

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$N_1 = -m' \dot{\gamma}^{n'}$$

$$y \quad \dot{\gamma} = \frac{2n+1}{2n} \frac{(-\dot{h})}{h} \frac{r}{h} \left(\frac{z}{h} \right)^{1/n}$$

Matthew y Bruce (1983) plantean que la ecuación para F puede ser escrita en forma adimensional con las variables siguientes:

$$F^* = \frac{F \lambda^n}{\Pi r^2 m} \quad h^* = \frac{h}{h_0} \quad t^* = \frac{t}{\lambda}$$

$$\lambda = \left(\frac{m'}{2m} \right)^{1/n'-n}$$

y

$$F^* = \frac{(-dh^*/dt^*)^n}{(h^*)^{2n+1}} \left(\frac{2n+1}{2n} \right)^n \left(\frac{R}{h_0} \right)^{n+1} \frac{1}{n+3} + \frac{2 (-dh^*/dt^*)^{n'}}{(h^*)^{2n'}} \left(\frac{2n+1}{2n} \right)^{n'} \left(\frac{R}{h_0} \right)^{n'} \frac{1}{n'+2}$$

Para el caso de fuerza específica $F^*(t^*)$, perfiles para $h^*(t^*)$ se obtienen de la evaluación numérica de

$$t^* = \int_1^{h^*} \frac{dh^*}{(dh^*/dt^*)}$$

para resolver la ecuación se utiliza el método de Runge-Kutta, y hay que hacerlo para el problema inicial

$$\frac{dt^*}{dh^*} = \frac{dt^*}{dh^*}(h^*, r^*)$$

$$t^* = 0 \text{ a } h^* = 1$$

Nótese que h^* es la variable móvil. A cada posición del plato superior h^* , el término $\frac{dt^*}{dh^*}$ se calcula de la ecuación para F utilizando el método de Newton.

dh^*

El tiempo medio $t_{1/2}$ se obtiene al integrar la ecuación siguiente hasta $h^* = 1/2$

$$\frac{dt^*}{dh^*} = \frac{dt^*}{dh^*}(h^*, r^*)$$

Matthew y Bruce (1983) plantean un procedimiento numérico a utilizar con fluidos que tienen funciones viscoelásticas arbitrarias.

Para fluidos tipo ley de la potencia, Campanella y Peleg (1987a), y con área constante plantean que el flujo comprimido lubricado está regido por:

$$F(t) = 2 \pi \int_0^R (T_{zz} - P_0) r dr$$

en que

$F(t)$: fuerza

T_{zz} : componente normal del término fuerza

P_0 : presión atmosférica

R : radio de la muestra

r : distancia desde el centro

Bird *et al.* (1977) y Chatraer *et al.* (1981) la evaluaron para fluido Newtoniano:

$$F(t) = \left(\frac{3 \Pi R^2 \mu}{H(t)} \right) \left(-\frac{dH(t)}{dt} \right)$$

en que

μ : viscosidad newtoniana

H (t): altura instantánea de la muestra.

Para un fluido ley de la potencia obtienen la relación

$$T_{zz} - P_0 = 3^{(n+1)/2} K \left(-\frac{dH(t)}{H(t)dt} \right)^n$$

que da origen a las relaciones siguientes:

Flujo a velocidad de deformación constante:

$$-\frac{dH(t)}{dt} = \text{constante} = V$$

$$\text{en que : } F(t) = \frac{3^{(n+1)/2} \Pi R^2 K V^n}{[H(t)]^n}$$

al tomar logaritmo queda

$$\text{Ln } F(t) = c + s1 \text{ Ln} \left(\frac{1}{H(t)} \right)$$

$$\text{en que : } c = \text{Ln} \left[3^{(n+1)/2} \Pi R^2 K V^n \right]$$

$$\text{y } s1 = n$$

K y n se calculan de la relación lineal o de la anterior.

En los gráficos siguientes se pueden analizar los gráficos H(t) versus t, F(t) versus t y log F(t) versus log (1/H).

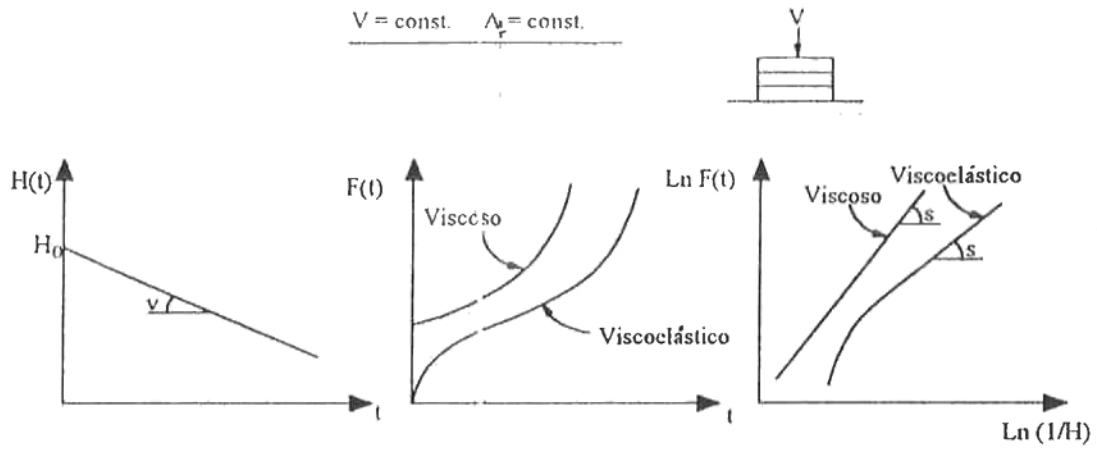


Fig. 79: Esquema del procedimiento de cálculo para flujo comprimido a velocidad y área constante (Campanella y Peleg, 1987t).

En el primero la pendiente es V .

En el segundo se puede distinguir entre fluido viscoso y viscoelástico.

En el tercero, el fluido viscoso es lineal y la pendiente da el valor de s y en el viscoelástico existe una región transiente, seguida a continuación por una región lineal donde se puede evaluar s .

Campanella y Peleg (1987) presentan las curvas de mantequilla de maní.

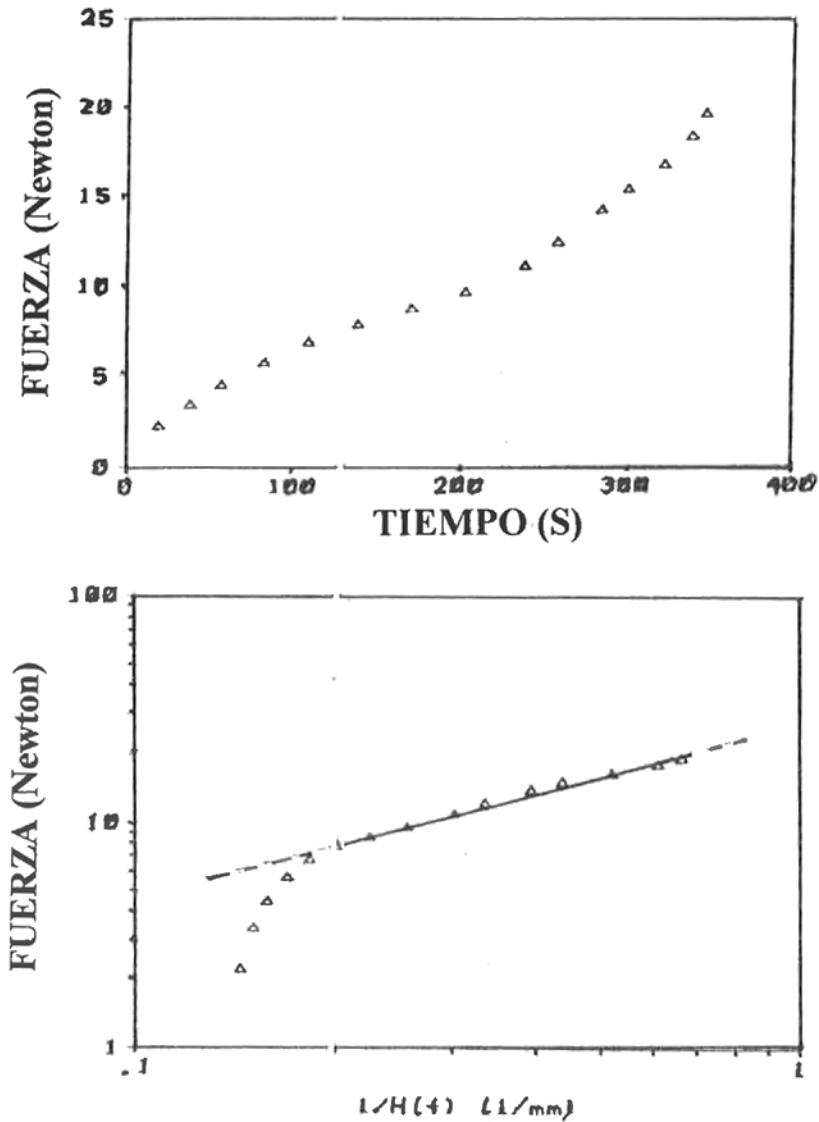


Fig. 80: Curvas típicas de fuerza versus tiempo y $\log F(t)$ versus $1/H(t)$ de mantequilla de maní sometidas a flujo comprimido a velocidad de deformación constante (Campanella y Peleg, 1987a).

Castro (1995) aplicó éstas metodologías a pasta para producir vienasas (Frankfurter, salchichas o perros calientes) con carne de vacuno, pavo y equino, con proporciones variables de proteínas (A, más alto contenido, B intermedio y C menor contenido de proteína).

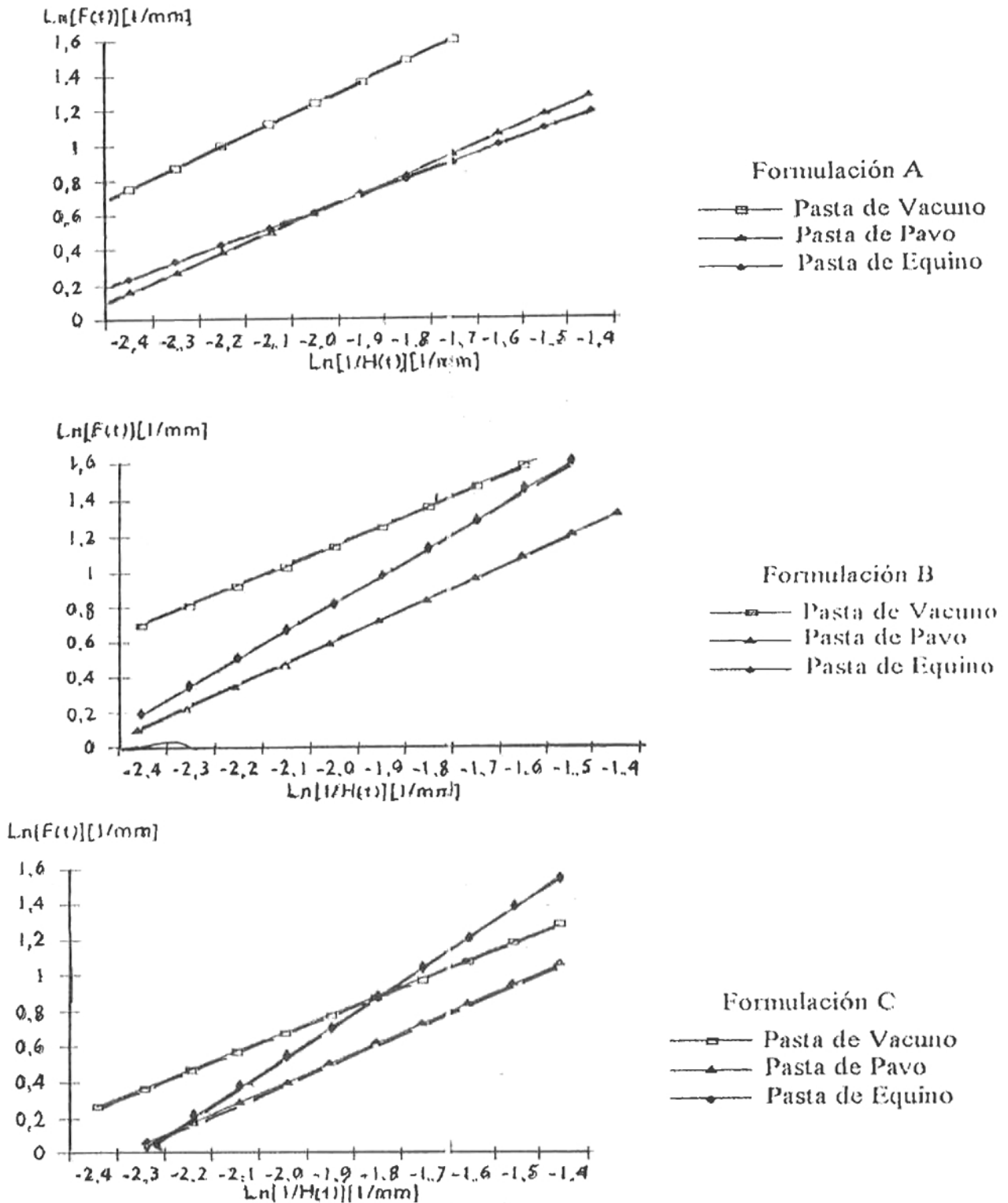


Fig. 81: Prueba de flujo comprimido, a velocidad de deformación constante. Modelo Ley de la Potencia para tres formulaciones de pasta de vienas a 28°C, altura inicial 11 [mm] (Castro, 1995).

Flujo comprimido bajo fuerza constante:

$F = \text{constante} = W$

Campanella y Peleg (1987b) plantean la relación siguiente:

$$\ln \frac{H(t)}{H_0} = -s_2 t$$

en que : $s_2 = \left(\frac{W}{3^{(n+1)/2} \pi R^2 K} \right)^{1/n}$

y H_0 : altura inicial de la muestra.

Recomiendan que las magnitudes de las constantes se pueden calcular de experimentos repetidos con al menos dos valores de W .

En las figuras siguientes se pueden analizar las situaciones logradas con la metodología planteada.

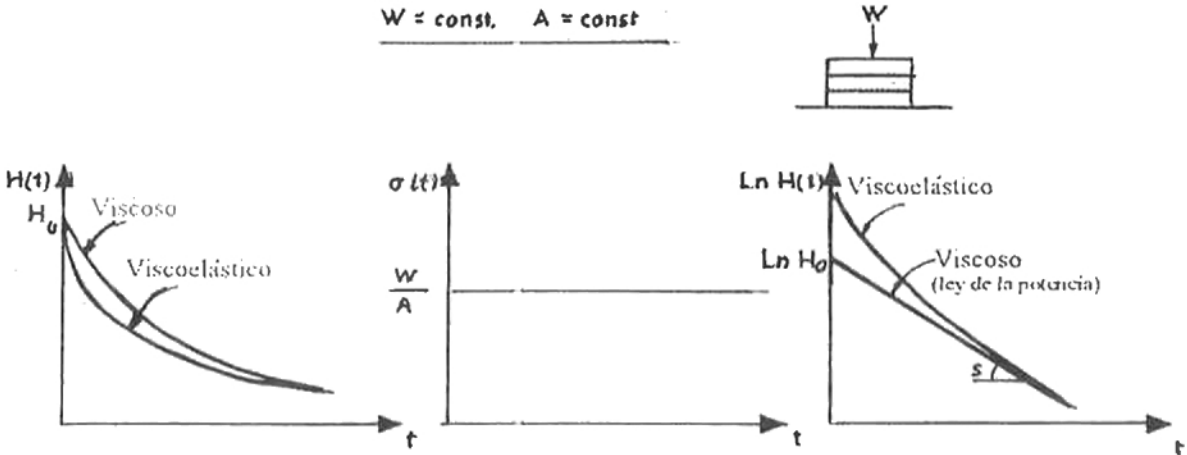


Fig. 82: Esquema de procedimiento de cálculo para flujo comprimido a esfuerzo y área constante (Campanella et al., 1987).

En el primer gráfico $H(t)$ versus t se distingue claramente entre fluido viscoso y viscoelástico, en el segundo gráfico de $\sigma(t)$ versus t no distingue entre los fluidos y en el tercero de $\ln F(t)$ versus t se distingue claramente entre viscoso y viscoelástico, permitiendo calcular s .

Campanella y Peleg (1987) lo aplicaron a mantequilla de maní, según se puede apreciar en las figuras siguientes:

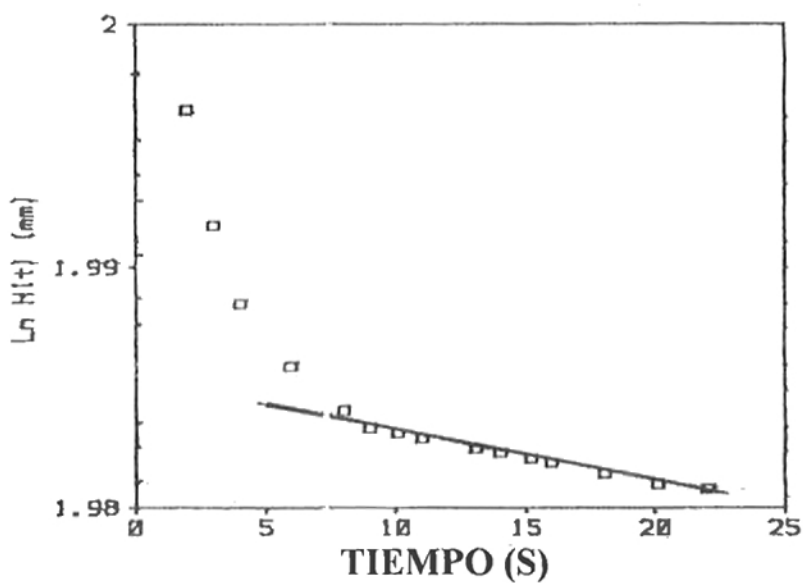
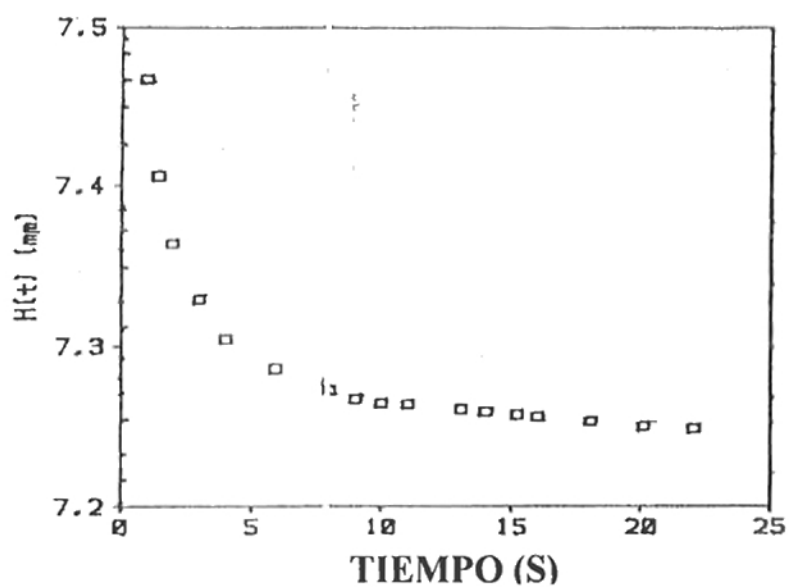


Fig. 83: Curvas típicas de $H(t)$ versus tiempo y $\log H(t)$ versus tiempo de mantequilla de maní sometidas a flujo comprimido a fuerza constante (Campanella y Peleg, 1987a).

ii) Flujo comprimido sin lubricación de las placas

Este es el caso de un experimento puro de shear (fatiga o esfuerzo de cizalla) aplicada al fluido, esta fatiga está dada por el roce entre el fluido y el plato.

De acuerdo a esto, la metodología se puede utilizar según Campanella (1992) para determinar la fatiga de fluencia de alimentos semi-líquidos y los parámetros de fluidos Herschel-Bulkley.

Al aplicar la metodología; Campanella (1992) plantea que de los experimentos se obtiene F versus t.

$$y H(t) = H_0 - Vt$$

en que

H_0 : altura inicial

V : velocidad de descenso del plato

t : tiempo

$$y \quad - \frac{dH(t)}{dt} = V \text{ (constante)}$$

así se logra:

$$F(t) = \frac{2}{3} \frac{\pi \sigma_0 R^3}{H_0 - Vt} + 2 \frac{\pi (n+1)^{n/(n+1)}}{n} \frac{(n+1) K^{1/(n+1)}}{4n+3} \sigma_0^{n/(n+1)} R^{(4n+3)/n} \frac{V^{n/(n+1)}}{(H_0 - Vt)^{(3n+1)/(n+1)}}$$

en que

σ_0 : umbral de fluencia

R : radio del disco

K : coeficiente de consistencia

n : índice de comportamiento de flujo

Se llama

$$K_0 = \frac{2}{3} \pi R^3$$

$$K_1 = 2 \pi (n+1)^{n/(n+1)} \frac{n+1}{4n+3} K^{1/(n+1)}$$

y

$$F(t) = \frac{K_0 \sigma_0}{H_0 - Vt} + K_1 \sigma_0^{n/(n+1)} R^{(2n+3)/(n+1)} \frac{V^{n/(n+1)}}{(H_0 - Vt)^{(3n+1)/(n+1)}}$$

Al aplicar una regresión no lineal se obtiene σ_0 , n y K_1 .

Con K_1 y n se puede calcular K .

Con estos datos se puede lograr el modelo de Herschel-Bulkley

$$\sigma = \sigma_0 + K (\dot{\gamma})^n$$

Campanella y Peleg (1987b) aplicaron flujo comprimido con fuerza constante y el sistema alcanza una altura de equilibrio siempre que la fuerza (W) no sea excesivamente alta.

El flujo en estas condiciones para fluidos tipo Herschel-Bulkley está dado por la ecuación siguiente:

$$\frac{n+1}{n} S_n X^2 - \frac{n+1}{2n+1} (-1-x)^{(2n+1)/n} - (-1-x)^{(n+1)/n} = 0$$

en que

n : es el componente en el modelo de Herschel-Bulkley

$$y X = \frac{H(t)}{2} \sigma_0 \frac{dP}{dr}$$

$H(t)$: altura de la muestra al tiempo t

$\frac{dP}{dr}$: gradiente de presión.

$$S_n = - \frac{R}{[H(t)]^2} \frac{K^{1/n}}{\sigma_0^{1/n}} \frac{dH(t)}{dt}$$

que es el número de plasticidad

y R : radio de la muestra

Para fluidos donde el número de plasticidad es bajo (σ_0 grande) y velocidades bajas ($dH(t)/dt \rightarrow 0$) la relación entre X y S_n llega a ser lineal con pequeña pendiente, que después de extrapolarlo da la expresión siguiente:

$$\sigma_0 = \frac{3 W H_A}{2 \Pi R^3}$$

en que H_A : es la altura asintótica que alcanza la muestra
Esta situación se puede visualizar en el gráfico siguiente:

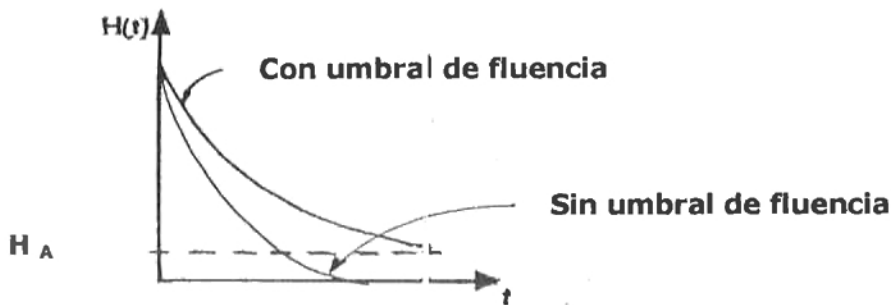


Fig. 84: Variación de la altura con el tiempo para fluidos con y sin umbral de fluencia, al estar sometido a flujo comprimido con $W = \text{cte}$ (Campanella y Peleg, 1987b).

Campanella y Peleg (1987b) lo aplicaron a concentrado de tomate, ketchup, mostaza y mayonesa, donde obtuvieron valores concordantes con los de reometría coaxial.

Viscosidad elongacional

Es la viscosidad que se presenta al producirse desplazamiento del fluido perpendicular a la fuerza que lo produce.

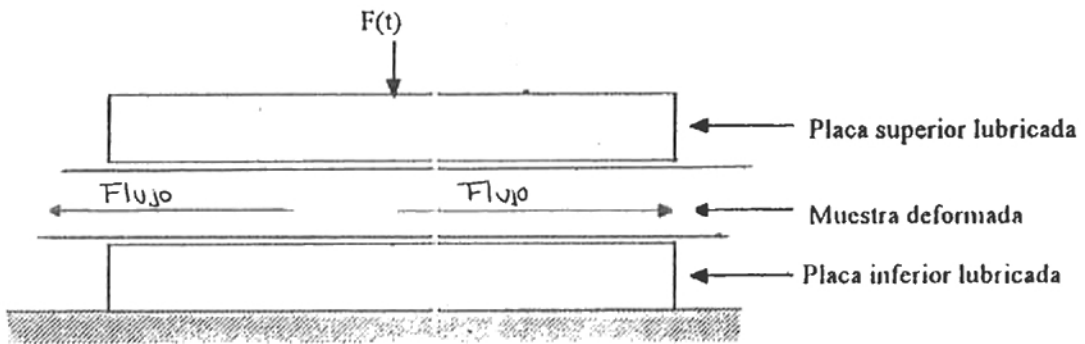


Fig. 85: Representación esquemática de la viscosidad elongacional.

Campanella *et al.* (1987) estudiaron la situación y plantean el modelo siguiente:

Son dos discos lubricados de radio R , en que el superior se desplaza a velocidad constante $= V_2$, y el inferior está fijo. La muestra, situada entre los discos, en cualquier instante, tiene una altura $H(t)$ que cumple:

$$H(t) = H_0 - V_2 t$$

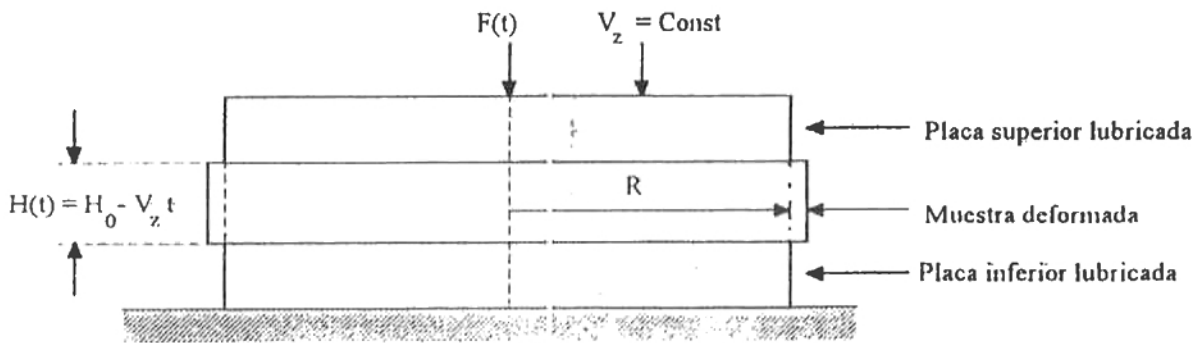


Fig. 86: Esquema de la situación en un instante t .

Si se eligen los ejes z y r para describir la situación se tendría lo siguiente:

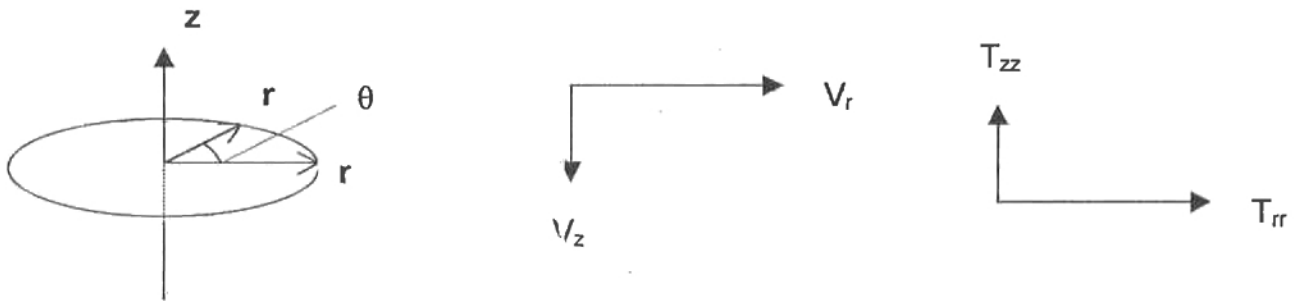


Fig. 87: Representación de los vectores velocidad y tensores T_{zz} y T_{rr} .

En la figura se presentan los vectores velocidad y los tensores T_{zz} y T_{rr} .

Las ecuaciones respectivas serían:

$$V_z = \dot{\epsilon}_T H(t)$$

$$V_r = -\dot{\epsilon}_T r/2$$

$$V_\theta = 0$$

en que

V_z : componente vertical de la velocidad

V_r : componente radial de la velocidad

V_θ : componente angular de la velocidad

$H(t)$: altura de la muestra en el tiempo t

r : distancia radial

$\dot{\epsilon}_T$: velocidad de deformación instantánea

$$\dot{\epsilon}_T = -\frac{1}{H(t)} \frac{dH(t)}{dt}$$

Si el instrumento opera a velocidad constante V_z , se tendría:

$$\dot{\epsilon}_T = \frac{V_z}{H_0 - V_z t}$$

en que

H_0 : altura inicial de la muestra

$$T_{zz} - T_{rr} = \frac{F(t)}{\pi R^2}$$

en que

R : radio del plato

El flujo producido, que es perpendicular a la fuerza que lo produce, es el flujo elongacional, y es regulado por una función llamada viscosidad elongacional dada por:

$$\mu_b = \frac{T_{zz} - T_{rr}}{\dot{\epsilon}_b}$$

en que

$\dot{\epsilon}_b$ es la velocidad de deformación biaxial extensional y es definida como

$$\dot{\epsilon}_b = \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_T$$

que al reemplazar los tensores y $\dot{\epsilon}_b$ en la expresión anterior da origen a:

$$\mu_b = \frac{2 F(t) [H_0 - V_z t]}{\Pi R^2 V_z}$$

Campanella *et al.* (1987) la aplicaron a queso para pizza, situación que se aprecia en la figura siguiente:

Viscosidad Elongacional (Pa.s)

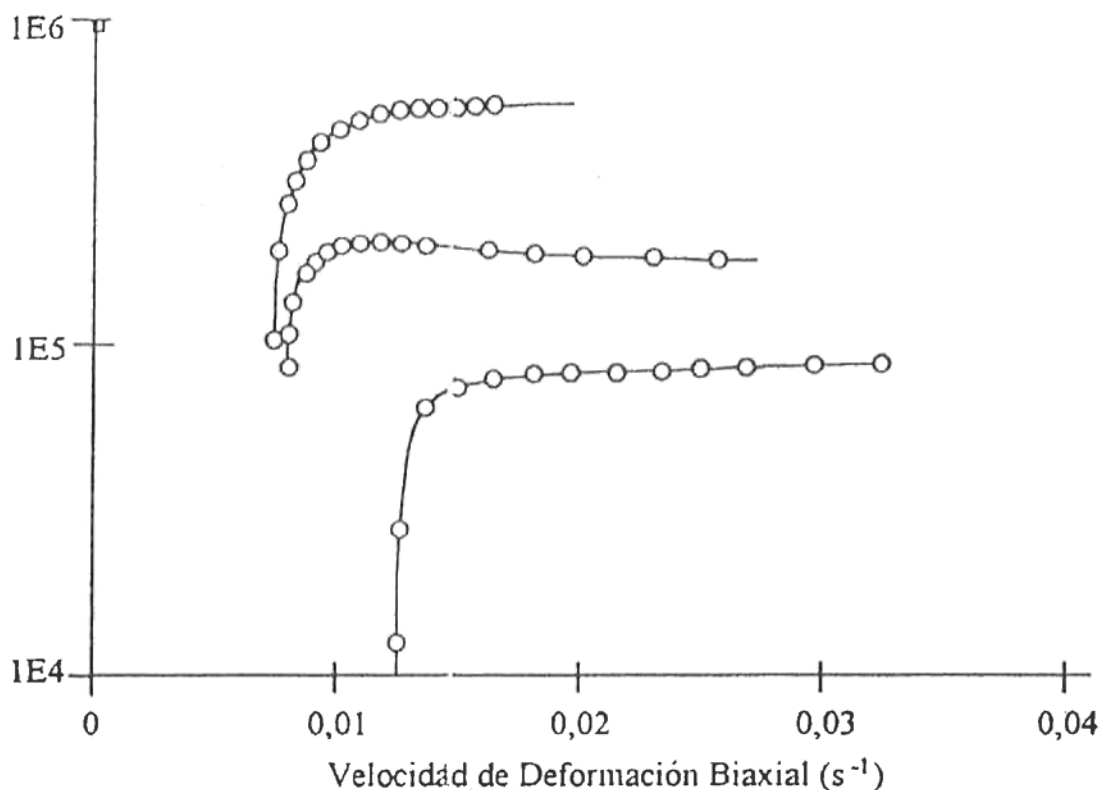


Fig. 88: Curva de viscosidad elongacional versus velocidad de deformación biaxial de queso americano a distintas temperaturas, marca nacional (Campanella *et al.*, 1987).

Castro *et al.* (1993) determinaron la viscosidad elongacional de pasta para producir vienesas (Frankfurter, perros calientes o salchicha) de tres especies (vacuno, pavo y equino) con tres formulaciones en que variaba la cantidad de proteína (A mayor cantidad de proteína, B intermedia y C menor cantidad de proteína) en que se encontraron variaciones de los valores de acuerdo a la especie y entre el contenido de proteína.

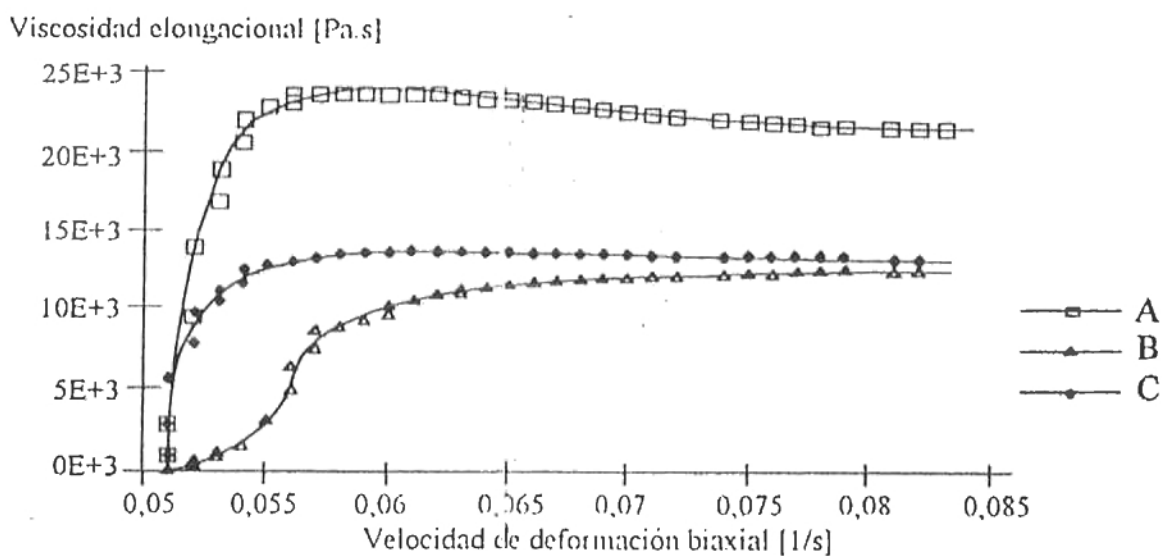


Fig. 89: Viscosidad elongacional en función de la velocidad de deformación biaxial para tres formulaciones de pasta con carne de equino, altura inicial 10 [mm] (Castro *et al.* 1993).

Referencias

- Bird, R.B., Armstrong, R.C. y Hassager, D. (1977) Dynamic of Polimeric Liquids, Vol 1. Wiley, New York.
- Bourne, (1978). "Texture profile analysis" Food Technol. 32(1), 62 – 66, 72.
- Campanella, O.H. y Peleg, M. (1987a). "Squeezing flow viscosimetry of peanut butter". J. Food Sci. 52, 180 - 184.
- Campanella, O.H. y Peleg, M. (1987b). " Determination of the yield stress of semi-liquid foods from squeezing flow data" J. Food Sci. 52, 214 - 217.
- Campanella, O.H.; Popplewell, L.M.; Rosenau, J.R. y Peleg, M. (1987). "Elongational viscosity measurements of melting American process cheese" J. Food Sci. 52, 1249 - 1251.
- Campanella, O.H. (1992). Comunicación personal.
- Castro, E., Osorio, F., Rojo, O., Arancibia, E. (1993). Caracterización reológica y textural de vienesa presentada al X Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 11-13 Nov.
- Castro, E. (1995). "Propiedades reológicas de emulsiones cárnicas para producir vienesas" Tesis de Magister en Ciencias de los Alimentos, U. de Chile. Santiago, Chile.
- 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.
- Finkowski, J.W., Peleg, M. (1981). "Some rheological characteristics of soy extrudates in tension" J. Food Sci. 46, 207 - 211.
- Hagger, H., V.I.E. (1997). Contribución al estudio de las propiedades texturales del mazapán. Tesis para optar al título de Ingeniero en Alimentos, Fac. de Ciencias Agrarias. U. Austral de Chile. Valdivia, Chile.

- 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.
- Katelung, G., Normand, M.D., Johnson, E.A., Peleg, M. (1991a). "Degree of elasticity determination in solids foods" J. Food Sci. 56, 950 - 953.
- Katelung, G., Normand, M.D., Nussinovitch, A., Peleg, M. (1991b). "Determination of elasticity of gels by successive compression – decompression cycles" Food Hydrocolloids 5(3), 237 – 247.
- Katelung, G., Normand, M.D., Johnson, E.A., Peleg, M. (1992). "Instrumental determination of elasticity of marshmallow" Journal of Texture Studies, 23, 47 - 56.
- Lee, Y.C., Rosenau, J.R., Peleg, M. (1983). "Rheological characteristics of Tofu" J. Texture Studies, 14, 143 - 148.
- Leider, D.J., Bird, R.B. (1974). "Squeezing flow between parallel disks. I Theoretical analysis". Eng. Chem. Fund. 13(4), 336 – 341.
- Leider, D.J. (1974). "Squeezing flow between parallel disks. II Experimental results" Ind. Eng. Chem. Fund. 13(4), 342 – 346.
- Matthew, A., McClelland y Bruce, A. Finlayson (1983). "Squeezing flow of elastic liquids" J. Non-Newtonian Fluid Mech. 13, 181 – 201.
- 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.
- Mohsenin, N.N. y Mittal, J.P. (1977). "Use of rheological terms and correlation of compatible measurements in food texture research" J. Texture Studies, 8, 395.
- 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.

- Okku, J.E., Sherman, P. (1979). Compression testing of cylindrical samples with an Instron Universal Testing Machine In Food Texture and Rheology (P. Sherman Ed.), Academic Press, London, p. 157 – 178.
- Peleg, M. (1976). "Considerations of a general rheological model for the mechanical behavior of viscoelastic solid food material" J. Texture Studies. 7, 243 -256.
- Peleg, M., Calzada, J.F. (1976). "Stress relaxation of deformed fruits and vegetables" J. Food Sci. 41, 1325 -1329.
- Peleg, M. (1977). "Operational conditions and the stress – strain relationship of solid foods" J. Texture Studies. 8, 283.
- Peleg, M. (1979). "A model for creep and early failure" Mater. Sci. Eng, 40, 197 – 205.
- Peleg, M. (1979). "Characterization of stress relaxation curves of solid foods" J. Food Sci. 44, 277 - 281.
- Peleg, M. (1980). Theoretical analysis of the relationship between hardness and its sensory assessment J. Food Sci. 45, 1156 - 1160.
- Peleg, M., Pollak, N. (1982). "The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analyses of solid foods" J. Texture Studies 13, 1 - 11.
- 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.
- Peleg, M. (1983). "Stress and strain activated fracture elements" J. Texture Studies. 14, 87 - 98.
- Peleg, M., Isabelle, Roy, Campañella, 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.
- Pollak, N. y Peleg, M. (1980). "Early indications of failure at large compressive deformations" J. Food Sci. 45, 815.

- 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.
- Purkayastha , S., Peleg, M. (1986). "Comparison between projected mechanical equilibrium conditions of selected food materials in stress relaxation and creep" J. Texture Studies. 17, 433 - 444.
- 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.
- Tang, J., Levelievre, J., Tung, M., Zeng, Y. (1994). "Polymer and ion concentration effects on gellan gel strength and strain" J. Food Sci. 59, 216-220.