

10529
19



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

**"PROPIEDADES REOLÓGICAS Y TEXTURALES DE
ALIMENTOS SEMISÓLIDOS TIPO UNTABLE"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :
KITZIA NOVOA HERNÁNDEZ

ASESORA: DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA.

COASESORA: I.B.Q. NORMA B. CASAS ALENCÁSTER

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO,

2003

A

**TESIS COM
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**TESIS
CON
FALLA DE
ORIGEN**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Propiedades Reológicas y Texturales de
Alimentos Semisólidos Tipo Untable

que presenta la pasante: Mónica Novoa Hernández
con número de cuenta: 2134234-0 para obtener el título de :
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de Septiembre de 2000

PRESIDENTE	<u>I.E.O. Rosa Manuela Arriaga Córdova</u>	
VOCAL	<u>Dra. Laura Patricia Martínez Padilla</u>	
SECRETARIO	<u>I.A. Laura M. Cortazar Figueroa</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>I.A. Sandra M. Rueda Enriquez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>I.A. Ma. Guadalupe Sosa Herrera</u>	

B

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

AGRADECIMIENTOS

*A Dios por haberme dado la paciencia
y la obediencia para la culminación de
este trabajo.*

*A mi MADRE que me ha apoyado y
acompañado en cada momento de mi vida.
Gracias Mamá. (V.L.)*

*A mis padrinos Don Jorge y Luz María sin
ustedes no sería la misma.*

*A mis maestras que me guiaron y apoyaron en
la realización de este sueño. Gracias maestra
Norma y en especial a la Doctora Paty por ser
mi guía, amiga y compañera.*

*A mi familia que sin importar distancias o
circunstancias nunca dejaremos de serlo.*

*Y a todos aquellos que creyeron en mí y que
son parte importante de mi vida.*

GRACIAS

C

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN	viii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	9

CAPÍTULO I. Generalidades.

1.1	Definición de textura	10
1.1.1	Tipo de pruebas para la evaluación de las propiedades mecánicas de los alimentos	13
1.1.2	Pruebas instrumentales de textura	15
	▪ Curva de perfil de textura	18
	▪ Parámetros texturales	20
	▪ Prueba de fatiga cíclica	21
1.2	Definición de reología	23
1.2.1	Conceptos generales	24
	▪ Deformación	24
	▪ Esfuerzo	24
	▪ Sólido y líquido	25
1.2.2	Clasificación del comportamiento reológico de los materiales	26
	▪ Flujo newtoniano	26
	▪ Flujo no-newtoniano	28
	▪ Flujo independiente del tiempo	28

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

▪ Flujo dependiente del tiempo	32
1.2.3 Viscoelásticidad	34
▪ Viscoelasticidad lineal	34
▪ Métodos para la evaluación del comportamiento viscoelástico	35
▪ Métodos estáticos (fluencia y relajación)	35
▪ Ensayos Oscilatorios	42

CAPÍTULO 2. Desarrollo experimental.

2.1 Características de los productos comerciales	51
2.2 Muestreo	53
2.3 Descripción de métodos	54
2.3.1 Pruebas texturales	54
▪ Perfil de textura	54
▪ Pruebas de fatiga cíclica	55
2.3.2 Caracterización reológica	56
▪ Pruebas de cizalla estacionaria	56
▪ Pruebas de fluencia	57
▪ Pruebas de cizalla oscilatoria	58

CAPITULO 3. Resultados y discusión.

3.1	Pruebas texturales	59
3.1.1	Perfil de textura	59
3.1.2	Prueba de fatiga cíclica	66
3.2	Caracterización reológica	69
3.2.1	Pruebas de cizalla estacionaria	69
3.2.2	Pruebas de fluencia	79
3.2.3	Pruebas de cizalla oscilatoria	84
	Conclusiones y recomendaciones.	96
	Bibliografía.	99

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Perfil de Textura (Bourne,1978).	18
1.2.	Curva representativa de una prueba de fatiga ciclica (Bourne, 1978).	22
1.3.	Representación del flujo de cizalla simple.	27
1.4.	Tipos de flujo viscoso de un material (Barbosa y col., 1989)	29
1.5.	Clasificación del comportamiento mecánico de los materiales (Steffe, 1995).	33
1.6.	Curva de fluencia-recuperación (Steffe, 1995).	36
1.7.	Curva representativa de un modelo de fluencia (Barbosa y col., 1989).	37
1.8.	Modelos de Maxwell y Kelvin (Steffe, 1995; Fiszman y col., 1983).	38
1.9.	Contribución de cada elemento del modelo mecánico de Burgers a la capacitancia total en una curva de fluencia.	40
1.10.	Curva de relajación de esfuerzo (Steffe, 1995).	41
1.11.	Deformación de cizalla oscilatoria entre placas rectangulares (Steffe, 1995).	43
1.12.	Cambio de la deformación en función a variación de la frecuencia y la amplitud de deformación (Steffe, 1995).	44
1.13.	Respuesta típica a un barrido de esfuerzo o de deformación mostrando la zona viscoelástica lineal definida por un valor crítico del barrido (Steffe, 1995).	48
1.14.	Respuesta sinusoidal de un sólido, líquido y un material viscoelástico (Fiszman y col., 1983).	50

3.1. Perfil de textura de los materiales en estudio.	59
3.2. Pruebas de fatiga ciclica en los materiales en estudio.	66
3.3. Curva promedio de viscosidad aparente de los materiales en estudio con los dos tipos de geometría utilizados.	77
3.4. Curva promedio de flujo de los materiales en estudio con los dos diferentes modelos matemáticos aplicados.	78
3.5. Curvas de capacitancia de fluencia de los materiales en estudio a un esfuerzo de 20 Pa.	83
3.6. Módulos dinámicos como una función de la frecuencia para los materiales en estudio.	87
3.7. Módulo dinámico como una función del esfuerzo de cizalla para los materiales de estudio con los dos tipos de geometrías utilizadas.	89
3.8. Viscosidad dinámica (η') en función de la frecuencia para los materiales de estudio.	92

ÍNDICE DE CUADROS

2.1. Formulación de los productos estudiados.	51
2.2. Composición química calculada de los productos en estudio.	52
2.3. Valores de pH y densidad obtenidos para cada uno de los productos en estudio.	52
3.1. Valores promedio de dureza obtenidos en perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.	60
3.2. Valores promedio de cohesividad obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.	61
3.3. Valores promedio de adhesividad y fuerza adhesiva obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.	63
3.4. Valores promedio del índice de elasticidad obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.	64
3.5. Valores promedio de gomosidad obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.	65
3.6. Valores promedio del porcentaje de pérdida de fuerza obtenidos para cada uno de los materiales en estudio en la prueba de fatiga ciclica.	68
3.7. Condiciones y geometrias seleccionadas en la prueba de cizalla estacionaria para los materiales en estudio.	74
3.8. Parámetros de los modelos de la Potencia y Herschel-Bulkley de los semisólidos estudiados.	75

3.9. Valores de la capacitancia total (J_T) a un esfuerzo de cizalla de 20 Pa después de 200 segundos, para cada uno de los materiales en estudio.	79
3.10. Porcentaje de contribución de la capacitancia instantánea (J_0) a la capacitancia total a un esfuerzo de cizalla de 20 Pa, para cada uno de los materiales en estudio.	79
3.11. Porcentaje de contribución de la capacitancia retardada (J_r) a la capacitancia total a un esfuerzo de cizalla de 20 Pa, para cada uno de los materiales en estudio.	81
3.12. Porcentaje de contribución de la capacitancia viscosa (J_v) a la capacitancia total a un esfuerzo de cizalla de 20 Pa, para cada uno de los materiales en estudio.	81
3.13. Condiciones, dispositivos e intervalos de esfuerzo para la zona lineal obtenidos para cada uno de los materiales en estudio.	86
3.14. Esfuerzos aplicados a los materiales en estudio en función de la frecuencia.	88
3.15. Constantes de la función potencia de G' y G'' en función de la frecuencia de los materiales de estudio.	90
3.16. Constantes de la función potencia de η' en función de la frecuencia de los materiales de estudio.	93
3.17. Índice de comportamiento al flujo (n) de los materiales de estudio obtenida en cizalla estacionaria y en cizalla oscilatoria.	94

RESUMEN

Este estudio tuvo como finalidad el comparar la respuesta reológica y textural de cinco materiales semisólidos de tipo untable. Los productos comerciales analizados fueron: crema de cacahuete, crema de avellana, queso fundido, betún de chocolate y cajeta. Las pruebas reológicas realizadas fueron de flujo, de fluencia y de cizalla oscilatoria, mientras que las pruebas texturales fueron, perfil de textura y una prueba denominada fatiga cíclica. Para las pruebas de flujo se utilizó un reómetro con control de esfuerzo de cizalla con una geometría rugosa comercial y otra recubierta con arena fina. Se obtuvo un intervalo pequeño de cizallamiento (0.01 a 10 s^{-1}). Los cuatro primeros productos presentaron un comportamiento plástico fluidificante. La cajeta no presentó esfuerzo de fluencia, únicamente fluidificación a la cizalla. En lo que respecta a las pruebas de fluencia, los cuatro primeros materiales presentaron comportamiento más cercano a un sólido, mientras que la cajeta presentó uno característico de fluido. Se aplicó un programa que define la contribución de cada elemento del modelo de Burgers de capacitancia a las curvas de fluencia. Se observó una relación lineal entre el esfuerzo de fluencia (σ_e) calculado con el modelo Herschel-Bulkley y el porcentaje de capacitancia instantáneo ($J_e/J_e \times 100$) obtenido en las pruebas de fluencia. En las pruebas de cizalla oscilatoria, la crema de cacahuete presentó un comportamiento predominante sólido. El queso fundido, el betún de chocolate y la crema de avellana mostraron una respuesta intermedia de materiales viscoelásticos en los que predomina ligeramente el módulo elástico sobre el módulo viscoso, reportados en orden de mayor a menor magnitud del módulo elástico, respectivamente. En lo que concierne a los resultados de textura, la crema de cacahuete mostró la máxima dureza de todas las muestras estudiadas, correspondiendo con el mayor módulo

elástico obtenido en los resultados reológicos, mientras que la crema de avellana presentó la mínima. En cuanto al porcentaje de pérdida de dureza obtenido en las pruebas cíclicas, la crema de cacahuete presentó el menor (7%) de las muestras estudiadas, mientras que para los productos restantes osciló entre el 22 y 28 %. Las pruebas de cizalla oscilatoria mostraron predominio del comportamiento sólido (módulo de almacenamiento) en la crema de cacahuete y predominio del comportamiento fluido en la cajeta, aunque por poca diferencia con la crema de avellana.

INTRODUCCIÓN

La importancia de evaluar las características reológicas y texturales de los alimentos ha sido discutida considerablemente en la literatura concerniente al procesamiento de los mismos. Éstas pueden ser de utilidad en el control de calidad y en el desarrollo de productos con textura definida, sin olvidar la relación que pudiera existir entre estas características con la aceptación del consumidor. Caracterizar reológicamente semisólidos presenta varias dificultades de tipo práctico, ya que no se pueden verter fácilmente en el contenedor de un reómetro sin perturbar su estructura y no se pueden cortar en forma de una geometría definida.

Los alimentos semisólidos untables se caracterizan por tener ya sea un alto contenido en materia grasa con sólidos finamente divididos como cocoa, cacahuete, avellana, azúcar (crema de cacahuete, crema de avellana, betún de chocolate); importantes cantidades de azúcar disuelta interaccionando con caseína concentrada (cajeta, dulce de leche, leche concentrada azucarada); emulsiones con un alto contenido en lípidos (mayonesa, margarina, crema) o materiales que contienen alto porcentaje de lípidos interaccionando con caseína (queso fundido).

El estudio reológico de los alimentos y la medición objetiva de las propiedades texturales de los mismos han tomado gran importancia en la industria de los alimentos. A pesar de que se han desarrollado un gran número de instrumentos para la medición de las propiedades texturales, la gran mayoría de éstos están centrados en la realización de pruebas de compresión y de resistencia al corte. En el caso de la textura en semisólidos, se realizan

rutinariamente algunas pruebas de penetración con conos estandarizados; sin embargo, el perfil de textura sigue siendo la prueba más compleja aplicada. (Bourne, 1982).

La plasticidad es otra característica reológica importante de estos productos, definida como la presencia de un esfuerzo mínimo necesario para iniciar el flujo (esfuerzo inicial o esfuerzo de fluencia), este esfuerzo está relacionado con la composición y la estructura del material. La determinación del comportamiento mecánico de los materiales a través de métodos reológicos involucra una serie de pruebas que permiten tanto determinar los esfuerzos de fluencia, así como el tipo de comportamiento cuando fluyen, este es el caso de las pruebas de cizalla y las pruebas de fluencia.

En el caso de materiales viscoelásticos, se pueden aplicar pruebas de relajación que permiten determinar la pérdida de esfuerzo que sufre un material con respecto al tiempo bajo una deformación constante y obtener un modelo que represente este comportamiento, o a través de las pruebas dinámicas que permiten determinar el carácter viscoelástico al cuantificar la variación de los módulos viscoso y/o elástico en función de la frecuencia (espectro mecánico).

En la literatura existen pocas investigaciones relacionadas con el comportamiento reológico y las propiedades texturales de productos alimenticios con características de semisólidos, probablemente debido a la complejidad de estos materiales. La crema de cacahuete ha sido el semisólido

más estudiado y probablemente el más complejo. A continuación se enlistan algunos de los estudios reportados.

❖ En una revisión de las correlaciones obtenidas entre atributos sensoriales y propiedades fisicoquímicas de materiales líquidos y semisólidos se encontró a la crema de cacahuete. Este trabajo relaciona los atributos sensoriales, como el espesamiento sensorial con el esfuerzo de cizalla ajustado a un modelo reológico, en función de la velocidad ordinaria de la lengua en la boca, el espacio entre la lengua y el paladar, la fuerza de compresión generada al masticar, el radio de la lengua y el tiempo dentro de ella. Esta relación se aplicó tanto para fluidos newtonianos y no-newtonianos (potencia) así como para fluidos con un comportamiento dependiente del tiempo de cizallamiento. Los valores obtenidos experimentalmente fueron sustituidos en una ecuación empírica en la que se encuentran implícitos los parámetros anteriores, bajo un esfuerzo de cizalla estimado en la boca. La línea obtenida en coordenadas logarítmicas indica la relación del espesamiento sensorial con el esfuerzo de cizalla generado por el alimento en la boca. La untabilidad es otro parámetro que fue relacionado con las propiedades reológicas, sugiriendo que la misma está relacionada con el inverso del esfuerzo de cizalla en la superficie del cuchillo, generado durante la acción de untar con el cuchillo hacia delante y hacia atrás en un material semisólido (Kokini, 1985).

❖ Otro estudio corresponde a la viscosimetría de flujo por compresión entre placas lubricadas de una mantequilla de cacahuete, donde se determinaron las constantes reológicas y se comparó entre una mantequilla nacional y varias marcas comerciales. Se realizaron dos tipos de pruebas en diferentes

condiciones (por ejemplo: diferentes alturas de compresión e intervalo de carga) todas bajo un área constante y a una temperatura de 22-24 °C, en donde parte de las muestras fueron sometidas a deformación uniaxial constante (utilizando diferentes niveles por medio de una máquina de deformación universal Instron modelo TM). Otra parte de las muestras, fueron sometidas a compresión uniaxial bajo varias cargas constantes usando el mismo instrumento. En las dos pruebas se calcularon el índice de consistencia (K) y el índice de flujo (n) por medio de una relación matemática de flujo por compresión, de Leider y Bird (Campanella y Peleg, 1987.)

❖ En otro trabajo se estudió la incorporación de harina de cacahuate a una mantequilla con la finalidad de disminuir un 30 % del contenido de grasa inicial (52.5 %), sin alterar sus características reológicas; para lo cual se aplicó un método estadístico de superficie de respuesta (RSM) que permitió determinar las condiciones del proceso de secado de la harina (temperatura, velocidad y espacio muerto en un secador de tambor), sin influenciar de manera negativa la gomosidad, dureza, tamaño de partícula y la separación de aceite. Para la preparación de la harina de cacahuate se utilizó un homogeneizador APV Gaulin y para la medición del tamaño de partícula se utilizó un instrumento Coulter LSTM. Los parámetros texturales fueron evaluados por medio de un texturómetro Stevens QTS25 (Lima y col., 2000).

❖ Gills y Resurrección (2000) estudiaron las propiedades físicas y sensoriales de una mantequilla de cacahuate tratada con aceite de palma y aceite vegetal hidrogenado, para prevenir la separación de aceite. Se determinaron las propiedades sensoriales de este producto por medio de un

panel, un Análisis Descriptivo Cuantitativo (QDA) y un Perfil de Textura. La muestra fue estabilizada con 0, 1.5, 2.0 y 2.5% de aceite de palma y de aceite vegetal hidrogenado, todas almacenadas por 153 días a 0, 21, 30, 45 °C. Posteriormente se determinó la oxidación de la mantequilla, como un indicador del tiempo de vida (estable o inestable). Las pruebas se asociaron con atributos de granulosidad, dureza, aceitosidad, percepción de sequedad del producto en la boca y la extensibilidad del mismo.

❖ En la investigación de los atributos de viscosidad y textura de pastas de cacahuate bajas en grasa, el objetivo fue evaluar las diferencias debidas a la composición y en la reducción de su contenido de grasa en más del 50 %, usando una combinación a partir de proteínas Simplese-500™, base de almidón PCR 352-1 y agua. Se utilizó un procedimiento reológico simple con un viscosímetro Brookfield HB-DVIII con adaptador de espiral a 23 °C. La reducción de grasa produjo pastas con un comportamiento no-newtoniano, independiente del tiempo y con un incremento en su comportamiento fluidificante (pseudoplástico). Para la viscosidad aparente (η_a) se desarrolló un modelo que estimó la variación debida a la concentración de los ingredientes. Se realizaron pruebas sensoriales de color, firmeza y granulosidad, en un perfil de textura, y se analizaron las características de recubrimiento en la boca (Singh y col., 2000).

❖ En un estudio referente a las propiedades reológicas de la mantequilla de cacahuate se analizaron dos tipos: una "100 % de cacahuate" y otra "suave" con aceite vegetal, usando 3 diferentes reómetros en varios modos. Todos los productos se mantuvieron en un refrigerador y fueron evaluados a una

temperatura de 24°C. Para los experimentos de control de deformación, curvas de flujo, fluencia y pruebas oscilatorias se utilizó el reómetro Rheometric Scientific ARES. Para la construcción de las curvas de Lissajous se utilizó el reómetro Bohlin CSM, éste ofreciendo la posibilidad de registrar el tiempo para la medición oscilatoria. La geometría utilizada fue de placas paralelas de diámetro de 25 mm. Durante la medición inicial de las propiedades se encontraron severos problemas de deslizamiento entre las placas de medición, los cuales se redujeron en gran proporción por medio del uso de una lija pegada a las placas paralelas del reómetro. El espacio entre las placas varió entre 0.5 mm y 2.8 mm. Para la determinación de la viscosidad del aceite de cacahuete y de la suspensión diluida, se utilizó una geometría Couette de doble espacio anular, con un espacio interno y externo de 2 mm, y una profundidad de 50 mm. La transición de un comportamiento sólido a líquido para ambas suspensiones fue destacado por los experimentos de fluencia y reportando la viscosidad como una función de la deformación. En la medición oscilatoria, predominó el comportamiento sólido (G') sobre el fluido (G''), comprobando esto por medio de las curvas de Lissajous, observándose la pérdida de la forma elíptica para deformaciones mayores de 10^{-2} . El módulo de pérdida, G'' , fue relacionado con la energía disipada. Ambas suspensiones presentaron un comportamiento de materiales plásticos, exhibiendo un umbral de fluencia aparente. En la medición oscilatoria ambos productos se evaluaron fuera de la zona de viscoelasticidad lineal. Se destacó su comportamiento tixotrópico, marcando una ruptura en la estructura bajo deformaciones altas y una recuperación parcial a deformaciones muy bajas siguiendo la evolución de los módulos en función del tiempo aplicando una deformación de 0.005 a 6.28 rad/s (Citerne y col., 2001).

❖ En otro estudio realizado en un producto similar a la cajeta denominado "Dulce de Leche", fueron analizados tres tipos diferentes de este producto (normal, bajo en calorías y de tipo confitado) determinándose a cada uno de los productos su dependencia con el tiempo de cizallamiento, usando un viscosímetro rotacional RV20 (Haake) a una velocidad de cizallamiento constante y a una temperatura de 30 °C por medio de un sensor de cilindros concéntricos (SVII). Las pruebas en cizalla oscilatoria se efectuaron en un reómetro Haake RV20 equipado con una geometría de placa-placa de 27.84 mm de diámetro, un espacio entre placas de 1 mm y a una temperatura de 30 °C. La región viscoelástica lineal fue determinada a una frecuencia constante de 1.45 Hz en un intervalo de amplitud de deformación de 0 a 30 %. Esta información fue utilizada para la obtención de los módulos de almacenamiento (G'), de pérdida (G'') y el complejo (G^*) y cuantificar el efecto del cizallamiento en las propiedades viscoelásticas. El comportamiento viscoelástico de los tres productos estudiados fue intermedio entre una solución concentrada y un gel, pero aquél que contenía agar presentó propiedades más cercanas a un gel que los otros dos. Las diferencias encontradas en el comportamiento viscoelástico fueron atribuidas a la diferente composición y a la presencia o ausencias de agentes espesantes. En cuanto al efecto del cizallamiento sobre las propiedades viscoelásticas, encontraron que los respectivos módulos disminuyeron en magnitud y predominó el comportamiento viscoso al elástico ($G'' > G'$) (Ferrero y col., 1999).

❖ En cuanto al queso fundido, se encontró un estudio referente al efecto del grado de compresión en un queso crema similar a este, por medio de un Perfil

de Textura a una velocidad de compresión de 5 cm/min, donde se analizó la influencia de la compresión sobre los parámetros texturales (Bourne y Comstock, 1981).

De acuerdo a lo expuesto anteriormente se puede constatar que en lo que respecta a la evaluación de las propiedades reológicas fundamentales en semisólidos, las que predominan son las oscilatorias y las clásicas curvas de flujo aunque es más común encontrar determinaciones puntuales de viscosidad de cizalla o viscosidad aparente con algunos instrumentos sencillos de tipo empírico que son difíciles de comparar.

En lo que respecta a la textura, se observan pocos estudios sobre el perfil de textura o pruebas más específicas, predominando la evaluación de la consistencia a través de pruebas de penetración.

Considerando que los semisólidos de estudio no presentan características típicas de fluido o de sólido y que es posible evaluarlos bajo diversas técnicas, el objetivo de este estudio es evaluar las propiedades reológicas y texturales por medio de pruebas de cizalla estacionaria, pruebas de fluencia y pruebas de cizalla oscilatoria relativas a las reológicas y el perfil de textura y fatiga ciclica como pruebas de textura, con la finalidad de sugerir métodos específicos para la evaluación de las propiedades texturales y reológicas de materiales semisólidos con características de tipo untable que permitan hacer más sencilla su evaluación ya sea para fines de control de calidad o para el desarrollo de nuevos productos.

OBJETIVO GENERAL:

Analizar la respuesta de cinco diferentes alimentos comerciales con características de semisólido (tipo untable) en pruebas texturales y reológicas.

OBJETIVO PARTICULAR 1.

Medir las propiedades texturales de los productos comerciales por medio del perfil de textura y una prueba de cizalla cíclica.

OBJETIVO PARTICULAR 2.

Medir el comportamiento reológico de los productos comerciales bajo pruebas de cizalla estacionaria, fluencia y cizalla oscilatoria.

OBJETIVO PARTICULAR 3.

Analizar la respuesta de los materiales en las diferentes pruebas realizadas con fin de identificar la problemática de medición y establecer las bases para abordar la caracterización de productos untables.

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.

1.1. DEFINICIÓN DE TEXTURA

Textura es un término difícil de definir por lo cual el tecnólogo en alimentos ha tenido que dar su propia interpretación.

Una definición general es aquella en que la textura es el atributo de una sustancia resultante de una combinación de propiedades físicas percibidas por el sentido del tacto, la vista, y el oído. Las propiedades físicas pueden incluir tipo, forma, número, naturaleza y conformación de los componentes estructurales.

Aunque no se tenga una clara definición de textura podemos decir con un alto grado de certeza que la textura de los alimentos está relacionado las siguientes características:

1. Pertenece a un apartado de propiedades mecánicas dentro de las propiedades físicas. Propiedades ópticas, eléctricas, magnéticas y térmicas son propiedades físicas que son excluidas de la definición de textura.
2. Ésta consiste de un grupo de propiedades físicas que se derivan de la estructura del alimento y no de una sola propiedad.
3. La textura se percibe por el sentido del tacto, usualmente en la boca, pero se pueden involucrar otras partes del cuerpo (frecuentemente las manos).
4. No está relacionada con el sentido químico del sabor u olor.

La calidad y aceptabilidad de los alimentos están muy influenciadas por sus propiedades texturales, las cuales también se pueden usar como atributos en la selección de alimentos frescos.

La medida objetiva de la textura de los alimentos (dureza, fibrosidad, viscosidad y otras características) es importante por sí misma, dado que la textura está fuertemente correlacionada en frutos, por ejemplo, con el sabor, el estado de maduración y el color.

Las características de la textura se perciben en la boca en cuatro etapas: (1) percepción inicial, (2) percepción inicial en el paladar, (3) durante la masticación, y (4) una impresión residual después de la masticación. Durante la primera impresión visual se observan características como cremosidad, difusión y fluidez. Durante la percepción inicial en el paladar, se detectan características tales como tipo y distribución de partícula, forma y contenido de aire. Durante la masticación se perciben dos o más atributos como elasticidad, viscosidad y adhesividad. A estos podrían añadirse atributos de fuerza, fracturabilidad, masticabilidad y gomosidad; y finalmente hay una impresión residual en la masticación en la que podrían incluirse atributos como aceitoso o grasiento.

Muchos procesos de alimentos tienden a cambiar las propiedades de textura de los mismos, generalmente debilitando la estructura con el fin de hacerlo más fácil a la masticación. Si bien algunos de estos cambios son inadvertidos, otros son frecuentemente indeseables. Un ejemplo de esto es el ablandamiento resultado de la conservación por congelación o irradiación en frutas y vegetales.

Los alimentos pueden ser clasificados dentro de dos grupos:

1.- **Alimentos nativos.** Son aquellos alimentos en los cuales la estructura original permanece intacta. Dentro de éstos se encuentran las frutas, el pescado, la carne, los vegetales, entre otros y sólo cambian la textura por procesos como calentamiento, enfriamiento y reducción de tamaño.

2.- **Alimentos formulados.** Son aquellos alimentos que son procesados a partir de varios ingredientes con el fin de hacer un producto alimenticio que no se encuentre en forma natural. El ejemplo de este tipo de modificaciones son: pan, catsup, helados, jaleas, mayonesa, dulces, salsas y embutidos; donde la formulación y el proceso de elaboración de éstos dan la estructura y textura característica.

Con esta clase de alimentos es posible cambiar la formulación variando la cantidad y la calidad de los ingredientes que son usados en los diferentes procesos, proporcionando más opciones para el control de la textura de producto terminado o el desarrollo de texturas específicas, así como estructuras no encontradas en los alimentos naturales (Sánchez. 1996; Bourne, 1982). Ejemplo de estos son los alimentos semisólidos tipo untable como son la margarina, la crema de avellana, la crema de cacahuete, el betún de chocolate, la cajeta y el queso fundido.

1.1.1 TIPO DE PRUEBAS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LOS ALIMENTOS.

El estudio de las propiedades mecánicas de los materiales se efectúa a través de diferentes tipos de pruebas:

Fundamentales: En este tipo de pruebas los resultados sólo dependen del material y no del instrumento o el método. Estos resultados se expresan en términos de potencias de masa, longitud y tiempo, donde todas las variables son conocidas y controladas.

Se recurre a estas pruebas como apoyo o complemento para determinar la estructura de los materiales, cuando se quiere caracterizar rigurosamente el comportamiento del mismo, para estudios básicos relacionados con otras características del material, para diseño, selección y control de equipo de proceso. Una prueba fundamental pierde validez si no se controlan aspectos como el manejo previo de la muestra y la historia de la misma.

Una limitante de la aplicación de este tipo de pruebas es que la heterogeneidad de la muestra complica su aplicación, debido a la dificultad de asegurar que los perfiles de velocidad o deformación sean iguales, además de lo complejo de tomar muestras con dimensiones específicas y homogéneas requeridas por el instrumento. Otro factor es que manejan esfuerzos, deformaciones y tiempos diferentes a los que se utilizan en los procesos de manufactura y durante el consumo de los alimentos. Es importante mencionar que para obtener resultados repetibles y válidos, es necesario estandarizar y controlar la historia de la muestra y su manejo.

Empíricas: Son aquellas que se efectúan con instrumentos que con frecuencia se diseñan o construyen para un material específico, por lo que los resultados están en función del instrumento, el método, la carga aplicada, la velocidad de aplicación de la carga, la geometría, dimensiones, orientación de la muestra y las condiciones de la prueba, lo que ocasiona que no sean reproducibles ni puedan expresarse en términos de cantidades reológicas fundamentales.

Estas pruebas arrojan como resultado un solo dato (distancia, fuerza, área, tiempo, velocidad). Las variables que intervienen no siempre son conocidas ni controladas. Los resultados que originan son en ocasiones específicos para un tipo de material y no siempre están perfectamente definidos (dureza, cohesividad, adhesividad, pegajosidad). Son válidos y comparables solo bajo el mismo instrumento, método, condiciones y geometría de la muestra. En este tipo de pruebas, los materiales están sujetos a una deformación bajo compresión, tensión, penetración, corte, flujo, extrusión o combinación de éstas.

Imitativas: Son aquellas que tratan de imitar las operaciones humanas sobre los materiales para juzgar su comportamiento mecánico (masticación, presión con los dedos, etcétera.) asumiendo las reacciones humanas.

Al igual que en las pruebas empíricas, influyen las dimensiones, forma, orientación del material, el dispositivo utilizado para la aplicación de los esfuerzos, el procedimiento, etcétera. Dentro de los instrumentos empleados se puede mencionar: los untómetros para mantequilla, el farinógrafo y amilógrafo para masas, el tenderómetro de mandíbula de Volodkevich, el

tenderómetro de dentadura del Instituto Tecnológico de Massachusetts (M.I.T.). Este último se utilizó como prototipo para la construcción de una unidad modificada para la medición de textura llamada texturómetro "General Food Texturometer", en el cual se sustituyó la mandíbula por un émbolo (superior) y una placa (inferior) y se le acondicionó con varias velocidades de masticación. Este finalmente fue adaptado a la máquina universal de deformación Instron.

Los texturómetros cuentan con una amplia variedad de dispositivos (conos, placas, agujas, cilindros, esferas, cuchillas, celdas de corte y extrusión, etc) y efectúan las pruebas ya sea bajo tensión y comprensión.

Las pruebas imitativas que tratan de simular las operaciones efectuadas por el hombre al masticar los alimentos se han ido alejando de esto y se han tratado de acercar más a lo que es una prueba fundamental o empírica. Por otro lado se ha desarrollado el análisis sensorial para la evaluación de la textura y se han obtenido correlaciones con pruebas empíricas e imitativas.

Las pruebas empíricas e imitativas proporcionan herramientas para evaluar las propiedades texturales de manera instrumental y objetiva (Sánchez, 1996; Bourne, 1982).

1.1.2 PRUEBAS INSTRUMENTALES DE TEXTURA.

Independientemente de los muy variados instrumentos utilizados en las pruebas de textura, todos tienen principios comunes.

En la mayoría de los casos se utiliza un dispositivo para la ejecución de la prueba que es el que hace contacto con el alimento para comprimirlo, cizallarlo, cortarlo o estirarlo. Estos dispositivos (también llamados puntas, sondas, sensores) tienen formas geométricas y dimensiones variadas: placas, cilindros, conos, esferas, cuchillas, alambres, agujas, cinceles, celdas especiales (Kramer, celdas de extrusión), por lo que ofrecen áreas de contacto también variadas. Excepciones a esto son los consistómetros en los cuales el material fluye por efecto de la carga hidrostática del mismo.

Modo de prueba. Básicamente existen dos modalidades para ejecutar una prueba: medir fuerza o medir distancia en un tiempo específico (medidas puntuales) o en función del tiempo. Si se controla la fuerza, se mide la distancia de la punta a través del alimento. Si se controla la distancia, se mide la resistencia que opone el material a que la punta comprima, estire o penetre la distancia establecida. Otra forma menos común es medir el tiempo en que una determinada cantidad de material fluye cierta distancia o el volumen de material que fluye en un tiempo dado (consistómetros) ya sea bajo efecto de alguna fuerza impulsora o por la presión hidrostática del mismo fluido.

Tipo de prueba. Las fuerzas ejercidas pueden ser de tensión (si la fuerza se aplica hacia afuera del alimento), compresión (si la fuerza se aplica hacia adentro del alimento), cizallamiento, torsión, extrusión, entre otras. Aún cuando el tipo de prueba sea compresión o tensión, debido a la forma geométrica y a las dimensiones de los dispositivos y las muestras, en realidad estas muestras son sometidas a diferentes tipos de esfuerzos y en muchas ocasiones ocurre cizallamiento, perforación, ruptura, etcétera de tal manera que la prueba es destructiva y altera la estructura del material.

Existen numerosos instrumentos que han sido utilizados para mediciones objetivas de determinadas propiedades texturales de los alimentos entre los que se pueden mencionar: prensas de cizalla, gelómetros, consistómetros, penetrómetros, tenderómetros, etcétera. La principal desventaja de estos instrumentos es que cada uno se concentra en sólo una pequeña parte de las propiedades mecánicas del material más que en una representación física de todos los parámetros necesarios para la completa descripción de la textura. Así, las prensas de cizalla y los tenderómetros miden la dureza, los gelómetros miden la firmeza y la fuerza de un gel, los viscosímetros miden la resistencia al flujo. Aún cuando estos instrumentos tienen un valor práctico cuando la calidad textural del alimento puede ser relacionada con la propiedad medida, es mínimo cuando se desea tener una completa descripción de los parámetros mecánicos de textura de manera similar a como son detectados en la boca (Sánchez, 1996; Bourme, 1982).

Análisis de perfil de textura. El análisis de perfil de textura (TPA, por sus siglas en inglés) es un término que fue concebido para describir el proceso de compresión por masticación de los alimentos mediante el empleo de instrumentos mecánicos dando como resultado la curva de fuerza-tiempo derivado de dicha simulación. El primer instrumento que se empleó para el desarrollo del TPA fue el texturómetro de General Foods (Friedman y col., 1963). Posteriormente se demostró que la máquina universal de deformación "Instron" podía, de igual forma, llevar a cabo el TPA (Bourne 1978, 1982) así como otros instrumentos tales como el masticómetro.

A la curva fuerza - tiempo obtenida del TPA se le conoce desde entonces como *Curva de Perfil de Textura* y a la extracción de los parámetros

como *Análisis de Perfil de Textura (TPA)*. El desarrollo de la electrónica y la computación permitió a Malcom C. Bourne (1978, 1982) adaptar la máquina universal de deformación "Instron" para efectuar un análisis de perfil de textura. De este manera, los texturómetros actuales además de efectuar la prueba típica del TPA, efectúan pruebas múltiples tales como: penetración, corte, extrusión (positiva y negativa), determinaciones puntuales de dureza, adhesividad, fuerza del gel, entre otras. Asimismo, estos instrumentos pueden efectuar pruebas bajo tensión y compresión. El Análisis de Perfil de Textura puede efectuarse tanto en alimentos sólidos como semisólidos y fluidos (Sánchez, 1996; Bourne, 1982).

Una curva típica del Análisis de Perfil de Textura es como se muestra en la Figura 1.1

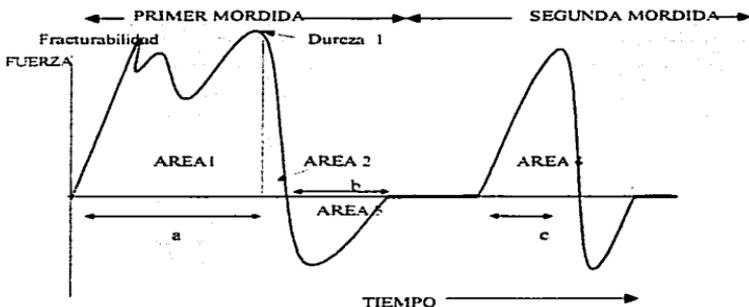


Figura 1.1. Perfil de textura (Bourne, 1978).

La prueba consiste básicamente en lo siguiente:

1. Es una prueba que mide la fuerza durante la compresión de la muestra.
2. Se le indica al instrumento que la punta o sensor comprima el alimento cierta distancia (expresada en mm o en % con respecto a la altura de la muestra) a una velocidad establecida. La prueba inicia cuando la punta o sensor detecta la superficie de la muestra y ésta será el punto de referencia. En esta parte la punta viaja hacia abajo hasta llegar a la distancia indicada.
3. La punta sube y se retira de la muestra, regresa a la posición de inicio de prueba (distancia de referencia).
4. En esta posición se espera el tiempo indicado.
5. Efectúa el segundo ciclo de compresión, bajando nuevamente la distancia indicada.
6. Finalmente regresa a la posición original.

Durante todo este proceso, la punta detecta la fuerza y se obtiene la curva fuerza-tiempo. En el ciclo de compresión se mide la dureza y al retirar, las propiedades adhesivas.

La forma de la curva puede variar en función de la muestra básicamente en las alturas de los picos positivos y negativos, las áreas bajo estos picos, la presencia de picos secundarios, altura y áreas negativas.

Las fuerzas positivas indican la resistencia que ofrece la muestra a la penetración o a la compresión por parte de la punta en el proceso de bajada. Las fuerzas negativas indican la fuerza debida a la muestra que se adhiere al retirarse el sensor.

De la curva se extraen los siete parámetros texturales definidos como:

1. **DUREZA:** Corresponde a la fuerza máxima necesaria para lograr la deformación de un material, ésta puede ser identificada como Dureza 1 durante el primer ciclo de compresión y Dureza 2 como resultado del segundo ciclo de compresión.
2. **FRACTURABILIDAD:** Corresponde a la fuerza de fractura, obtenida a través del primer pico significativo en la curva durante el primer ciclo de compresión, algunas veces considerada también como fragilidad.
3. **COHESIVIDAD:** Extensión con la cual un material puede ser deformado antes de su ruptura. Es la relación entre el área positiva durante el segundo ciclo de compresión dividida entre el área positiva durante el primero (A_2/A_1). Este resultado es un indicador de la viscoelasticidad de un material. Un valor de 1 indica que el material es totalmente cohesivo. Los materiales fluidos que no tienen estructura susceptible a ser destruida, suelen producir valores altos de cohesividad, dando una impresión errónea respecto a este parámetro.
4. **ADHESIVIDAD:** Definida como el trabajo necesario para superar las fuerzas atractivas entre la superficie del alimento y la superficie del material con el cual entra en contacto. Esta corresponde al área negativa del primer ciclo de compresión (A_3) en el gráfico fuerza contra tiempo (TPA). Referente también a cuán pegajoso es el material.

5. **ELASTICIDAD:** Corresponde a la velocidad con la cual un material regresa a su condición original después de retirar la fuerza de deformación. En el gráfico fuerza-tiempo es la altura que la curva recupera entre el término del primer ciclo de compresión y el inicio del segundo. Cabe aclarar que aún cuando la elasticidad es una relación de distancias sus valores se pueden obtener de la curva fuerza – tiempo y se refiere a la distancia que el dispositivo recorre durante el segundo ciclo de compresión (c). Este valor (c) dividido por la distancia recorrida durante el primer ciclo de compresión (a) representa el índice de elasticidad y determina el carácter líquido o sólido de un material. Un valor de 1 indica que el material es totalmente elástico, aún cuando está influenciado por el tiempo de espera entre los dos ciclos de compresión.
6. **GOMOSIDAD:** Energía necesaria para desintegrar un alimento semisólido al grado de poder ser deglutido. Es el producto de la dureza por la cohesividad y aplica a alimentos semisólidos.
7. **MASTICABILIDAD:** Energía requerida para masticar un alimento y poder ser deglutido. Es el producto de la gomosidad y elasticidad en una curva fuerza-tiempo y aplica a alimentos sólidos.

Pruebas de fatiga cíclica. Las pruebas de fatiga cíclica es otro tipo de simulación mecánica que puede llevarse a cabo en un texturómetro, consiste principalmente en someter a un material a varios ciclos de compresión – descompresión situando el dispositivo en el centro del recipiente a partir del cual viaja varias veces hacia arriba y hacia abajo durante un periodo de tiempo. En esta prueba se determina la pérdida de estructura del material por

efecto del cizallamiento. Una curva representativa de este tipo de prueba es como se muestra en la Figura 1.2.



Figura 1.2 Curva representativa de una prueba de fatiga cíclica (Bourne, 1978).

De la curva de fuerza-tiempo se obtienen las fuerzas máximas y áreas correspondientes a cada ciclo de compresión.

1.2 DEFINICIÓN DE REOLOGÍA

La reología es la ciencia de la deformación y flujo de la materia, que puede definirse como la relación entre las fuerzas que actúan en un material y en la manera en la cual este material se deforma o fluye como respuesta a esas fuerzas.

Es una rama de la física que se ocupa preferentemente de la deformación de los cuerpos aparentemente continuos y coherentes, pero con frecuencia trata también de la fricción entre sólidos y del flujo de polvos. También se llama reología al estudio físico del comportamiento mecánico de los materiales (Muller, 1978; Giles, 1985; Steffe, 1995).

Existen cuatro razones fundamentales para justificar el estudio del comportamiento reológico de los cuerpos:

- Contribuye al conocimiento de su estructura, por ejemplo, existe cierta relación entre el tamaño y forma molecular de las sustancias en disolución y su viscosidad, así como entre el grado de interacción de las macromoléculas y su elasticidad.
- En la industria se efectúan con frecuencia medidas reológicas sobre las materias primas y los productos en elaboración, que son de gran utilidad para el control de los procesos.

- La reología presta una valiosa ayuda al diseño de los procesos; es preciso que tolvas, tuberías y bombas se adecuen a las características de los productos con los que van a ser utilizadas.
- Las características reológicas influyen de un modo considerable en la aceptación de un producto.

1.2.1 CONCEPTOS GENERALES

▪ **Deformación:** Corresponde al cambio de forma, volumen o de ambos en un material, resultante de la modificación de las distancias relativas entre las paredes del mismo causada principalmente por una fuerza aplicada. Se distinguen dos tipos de deformación de la materia.

1) La deformación elástica cuando al cesar la fuerza deformante el cuerpo recupera su forma. ésta es una *deformación reversible*, conocida como elasticidad.

2) La deformación plástica o permanente si subsiste al desaparecer la causa y ésta es una *deformación irreversible* conocida como flujo.

▪ **Velocidad de deformación:** Es el cambio en la deformación de un material por unidad de tiempo, también se conoce como velocidad de cizalla si la deformación es el en plano y-x.

▪ **Esfuerzo:** Es la fuerza aplicada a un material por unidad de área.

▪ **Tipos de esfuerzo.** El esfuerzo es utilizado lo mismo en sólidos como en líquidos. Existen diferentes tipos de esfuerzos, los de tensión y los de compresión son los de mayor utilidad para sólidos (Steffe, 1995).

- a) **Esfuerzo de tensión:** Es el esfuerzo normal debido a las fuerzas dirigidas desde el plano en el que actúan hacia afuera del mismo.
- b) **Esfuerzo de compresión:** Es el esfuerzo normal debido a las fuerzas dirigidas hacia el plano sobre el cual actúan.
- c) **Esfuerzo de cizallamiento o esfuerzo de corte:** La componente del esfuerzo paralela (o tangencial) al área considerada.
- d) **Esfuerzo volumétrico:** Esfuerzo o presión externa aplicada a un material modificando su volumen.

▪ **Sólido y Líquido.** La distinción entre un líquido y un sólido es relativamente compleja cuando se refiere a un material no newtoniano y/o cuando son materiales con características viscoelásticas. Técnicamente un sólido se define como un cuerpo firme, macizo, cuyas moléculas tienen entre sí mayor cohesión (fuerza) que la de los líquidos y un líquido se define como un material que fluye o puede fluir. Un fundamento de la reología es "que todo fluye", no obstante el que cualquier material aparentemente fluya o no, depende frecuentemente del tiempo de observación y de las características del tiempo de respuesta de dicho material. Si el tiempo requerido para una relajación de esfuerzo (p.e. para que "el flujo" ocurra) es relativamente largo con respecto al tiempo ordinario de observación, este material puede ser clasificado como un sólido, mientras que un tiempo de relajación relativamente corto es un indicador del comportamiento fluido del material.

Muchos materiales en reposo parecen resistir un límite de esfuerzo y al ser alterados se deforman continuamente. Tal comportamiento es llamado plástico (o semisólido) y es típico de pastas, suspensiones y emulsiones relativamente concentradas (p.e. sangre, pinturas, mantequilla, etc). El carácter viscoelástico de un material está definido por las características tanto de sólido como de líquido. Estos materiales exhiben un comportamiento sólido a esfuerzos menores que el esfuerzo de fluencia y un comportamiento líquido a esfuerzos más altos.

Es evidente que una clara distinción entre un fluido y un sólido no siempre es posible, ni siempre necesaria (Darby, 1986).

1.2.2 CLASIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS MATERIALES.

- **Flujo newtoniano:**

El carácter reológico de un material se puede evaluar con base en su respuesta a una velocidad de cizalla. Esto es ilustrado en la Figura 1.3, donde el material se encuentra entre dos placas paralelas separadas por una distancia Δy . Si se le aplica una fuerza paralela a la placa superior F_x , ésta es forzada a moverse en la dirección x sobre ese mismo plano, mientras la placa inferior se mantiene estática. Esta fuerza dividida por el área de la superficie superior sobre la cual actúa, se define como el esfuerzo de cizalla transmitido al material (σ).

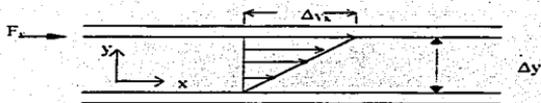


Figura 1.3 Representación del flujo de cizalla simple.

Entonces el material transporta cierta cantidad de movimiento entre las capas paralelas o láminas, cuyas velocidades son proporcionales a la distancia de la placa inferior. Así, para un fluido newtoniano, el esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la variación de la velocidad con la distancia, es decir al gradiente de velocidad:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dy} \quad (1.1)$$

Donde η es la viscosidad. Se puede decir que para tales fluidos, este gradiente se denomina de forma general como velocidad de cizalla (dv/dy), resultando de esta forma la ecuación de viscosidad de Newton:

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (1.2)$$

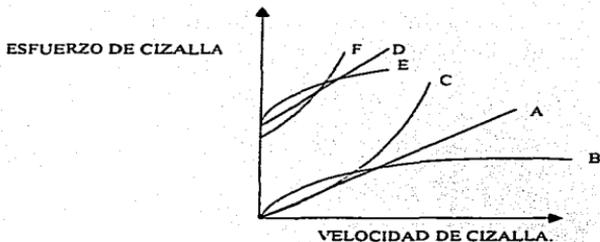
donde σ es el esfuerzo de cizalla y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla. Si la viscosidad es independiente de la velocidad de cizalla (o del esfuerzo de cizalla) el fluido es newtoniano. Los líquidos simples, soluciones verdaderas, disolventes de bajo peso molecular, dispersiones macromoleculares diluidas,

soluciones de polímeros que no interactúan y con bajo contenido en sólidos presentan comportamiento ideal newtoniano.

No obstante, existen muchos materiales alimenticios muy complejos (p.e. emulsiones, suspensión de sólidos, biopolímeros en solución tales como carbohidratos, proteínas en solución, etcétera) los cuales no obedecen el comportamiento anterior. Por ejemplo, los que exhiben un adelgazamiento o un comportamiento espesante (disminución o aumento de la viscosidad con la velocidad de cizalla) y algunos otros que exhiben un esfuerzo de fluencia. Generalmente parece que a mayor interacción molecular, mayor viscosidad (Geankoplis, 1995; Steffe, 1995; Barbosa y Ma, 1989).

- **Flujo no -newtoniano:**

Flujo independiente del tiempo: Aunque la mayoría de los gases y líquidos simples experimentalmente se comportan como fluidos newtonianos en la región de flujo laminar, varios sistemas incluyendo emulsiones, suspensiones y soluciones de moléculas largas, se aproximan al comportamiento newtoniano sólo a esfuerzos y velocidades de cizalla muy bajos. A un nivel más alto de cizalla, tales sistemas pueden desviarse del comportamiento ideal newtoniano en una o varias formas, como se muestra en la Figura 1.4:



A) Newtoniano, B) Fluidificante, C) Espesante, D) Fluido de Bingham, E) Fluidificante con umbral de fluencia (Herschel-Bulkley), F) Espesante con umbral de fluencia.

Figura. 1.4 Tipos de flujo viscoso de un material (Barbosa y Ma, 1989).

Donde la línea recta A, que pasa por el origen y posee una pendiente constante representa un fluido newtoniano ideal. La curva B, que también pasa por el origen, representa un fluido fluidificante. Para tales materiales la viscosidad no es una constante en toda su extensión, es a su vez una función de la velocidad de cizalla, donde toma un valor a cada instante, y esta cantidad es conocida como viscosidad aparente.

Análogamente, la curva C pasa por el origen, pero en contraste posee una curvatura cóncava a medida que aumenta la velocidad de cizalla. A tales materiales se les llama reoespesantes y generalmente están limitados a suspensiones concentradas o pastas acuosas.

Otro importante fenómeno relacionado con el flujo es la existencia de un valor umbral. Corresponde a materiales que realmente fluyen bajo un cizallamiento suficiente pero no fluyen si el esfuerzo de cizalla es inferior a un cierto valor, el cual se llama valor umbral o esfuerzo de fluencia. Ejemplos de este tipo de comportamiento son diversos materiales como los helados y la clara de huevo batida, entre otros y se les denominan materiales plásticos. Una vez que se excede el valor del umbral de fluencia, la velocidad de cizalla puede ser proporcional al esfuerzo de cizalla, como en el caso de fluidos de Bingham (curva D). Los materiales que exhiben un esfuerzo de fluencia también pueden presentar no-linealidad en el cociente obtenido al dividir el esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla, denominados fluidos Herschel-Bulkley o fluidificantes con un esfuerzo de fluencia (curva E) y fluidos espesantes con esfuerzo de fluencia (curva F) aunque en estos últimos no se han reportado para materiales alimenticios. Estos tipos de comportamiento al flujo están referidos al estado estacionario o flujo independiente del tiempo. Los fluidos newtonianos, fluidificantes y espesantes, no poseen un esfuerzo de fluencia, pudiendo ser llamados todos ellos líquidos.

Existen dos ecuaciones comunes para caracterizar estos fluidos no-newtonianos, el modelo de la potencia Ec. (1.3) y el modelo Herschel-Bulkley Ec (1.4) el cual incluye un esfuerzo de fluencia.

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (1.3)$$

$$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1.4)$$

Donde n es el índice de comportamiento al flujo, σ_0 es el esfuerzo de fluencia o esfuerzo umbral, K es el índice de consistencia y $\dot{\gamma}$ la velocidad de cizalla.

La dependencia con respecto a la velocidad de cizalla pone de manifiesto el cambio de estructura dentro del sistema. El comportamiento fluidificante indica una ruptura continua o reorganización de la estructura, dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo. El espesamiento evidencia la elaboración o reorganización de estructuras, dando como resultado un aumento de la resistencia al aplicar la fuerza. El comportamiento fluidificante se debe a la presencia de:

1. Compuestos de elevado peso molecular o partículas alargadas a concentración suficientemente baja.
2. Alta interacción entre partículas, causando su agregación o asociación por enlaces secundarios.
3. Relación axial elevada y asimétrica de las partículas.
4. Variación de la forma y tamaño de las partículas permitiendo su apilamiento.
5. Partículas no rígidas o flexibles, que pueden sufrir un cambio en su geometría o conformación.

El reoespesamiento puede explicarse por la presencia de partículas de formas y tamaños variados, ceñidas y estrechamente unidas, con lo que el flujo se torna relativamente más difícil con el aumento del esfuerzo de cizalla. Con el aumento de la velocidad de cizalla, las partículas largas y flexibles pueden estirarse, aumentando gradualmente la relación axial de las partículas:

lo que contribuye a su espesamiento, conocido como dilatación.

Gran variedad de alimentos líquidos exhiben un comportamiento al flujo de acuerdo con el modelo Herschel-Bulkey. En general, los purés de frutas y vegetales con partículas suspendidas y de alta concentración son ejemplo de éstos (Steffe, 1995; Barbosa y Ma, 1989).

Flujo dependiente del tiempo: Algunos materiales exhiben características de flujo tales que al aumentar el tiempo de flujo bajo condiciones de cizallamiento constantes, pueden desarrollar una disminución o un aumento de la viscosidad. El primero de estos efectos es denominado tixotropía, mientras que el último se conoce como anti-tixotropía, y ambos se atribuyen al cambio continuo de la estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible.

Los factores que contribuyen a la fluidificación también contribuyen a la tixotropía, y los factores causantes del espesamiento también causan anti-tixotropía. La tixotropía es una dependencia del tiempo semejante a la dependencia de la velocidad de cizalla, y es el resultado de la reorganización estructural, con una disminución a la resistencia al flujo.

El comportamiento anti-tixotrópico implica la elaboración o reorganización de estructura, que trae consigo un aumento de la resistencia al flujo.

La siguiente Figura presenta una clasificación esquematizada del

comportamiento mecánico de los materiales.

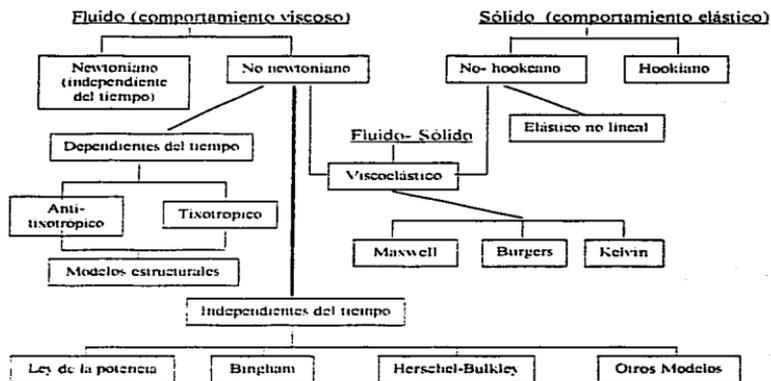


Figura 1.5. Clasificación del comportamiento mecánico de los materiales (Steffe, 1995).

En el caso de los sólidos un material elástico ideal es aquel que se deforma instantáneamente con la aplicación de una fuerza, e instantáneamente regresa a su forma original cuando la fuerza se retira, conocido como sólido hookiano.

Para ciertos cuerpos sólidos, la relación entre fuerza y deformación es una línea recta que parte desde el origen hasta el llamado límite de elasticidad.

Para cuerpos que muestran elasticidad retardada, la deformación es una función tanto del esfuerzo como del tiempo por lo tanto la recuperación del material no es instantánea, esto es debido a que el esfuerzo que es aplicado se reduce y el material no se recupera en su totalidad, denominado como sólido no-hookiano.

Ciertos cuerpos combinan las propiedades de viscosidad y elasticidad y son llamados materiales viscoelásticos, los cuales tienen un comportamiento y propiedades dependientes del tiempo, que se ven reflejados en las pruebas de fluencia y de relajación; es decir, en estos cuerpos la deformación y recuperación no ocurren de manera instantánea y presentan características tanto de sólidos como de líquidos cuando se les somete a esfuerzos o a deformaciones pequeñas.

1.2.3 VISCOELASTICIDAD

Algunos productos semi-líquidos o semi-sólidos presentan conjuntamente propiedades de flujo viscoso y sólido elástico, denominándose viscoelásticos. La viscosidad es una propiedad que todos los fluidos presentan, mientras que el comportamiento elástico unos lo exhiben y otros no, por lo tanto muchos fenómenos no pueden ser descritos como una función única de la viscosidad y el comportamiento elástico debe ser tomado en consideración.

- **Viscoelasticidad lineal:** Cuando los materiales son probados en la zona lineal, las funciones del material no dependen de la magnitud del esfuerzo, la magnitud de la deformación o de la aplicación de la deformación. Si el

esfuerzo es aplicado en la zona lineal, se producirá una deformación proporcional como respuesta denominada como viscoelasticidad lineal. La zona lineal de las pruebas es determinada de datos experimentales. Las pruebas pueden fácilmente entrar en la zona no-lineal por la aplicación de una excesiva deformación (usualmente mayor al 1 %) o debido a la aplicación de altas velocidades de deformación.

- **Métodos para la evaluación del comportamiento viscoelástico.** Los métodos para determinar las funciones materiales en la zona de viscoelasticidad lineal pueden ser divididos en dos categorías: métodos estáticos y métodos dinámicos. Los primeros involucran las pruebas de fluencia (esfuerzo de cizalla constante) y las de relajación (deformación de cizalla constante). Los métodos dinámicos involucran la aplicación de un esfuerzo de cizalla oscilatorio (Steffe, 1995).

- **Métodos Estáticos:**

Fluencia.

a) En una prueba de fluencia, un material es sujeto a un esfuerzo de cizalla o de compresión constante durante un tiempo determinado y se estudia la variación de la deformación.

Este método analítico ha sido usado para el estudio de alimentos fluidos como los aderezos y varios cuerpos complejos tal como naranjas enteras.

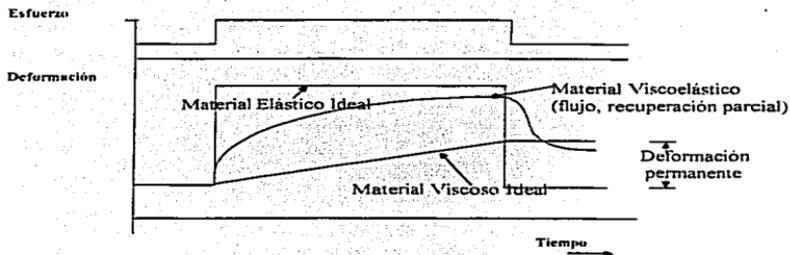


Figura 1.6. Curva de fluencia - recuperación (Steffe, 1995).

La Figura 1.6 ilustra las curvas de fluencia - recuperación donde el material se sujeta a un esfuerzo de cizalla constante para diferentes tipos de materiales, la deformación (γ) de un material elástico ideal puede ser constante debido a la carencia de flujo, y el material puede regresar a su forma original sobre el esfuerzo aplicado. Un material viscoso ideal puede mostrar un estado de flujo, produciendo una respuesta lineal al esfuerzo aplicado (σ), con la incapacidad de recuperarse de la deformación impuesta.

Los materiales viscoelásticos (p.e. la masa de pan) pueden exhibir una respuesta no lineal a la deformación γ debido a su habilidad de recobrar algo de su estructura por la energía almacenada, muestran una deformación menos permanente.

Los resultados se expresan en términos de la capacitancia (J) en función del tiempo (t). La capacitancia $J(t)$ es la relación entre la deformación que se

produce y su correspondiente esfuerzo aplicado, recíproco del módulo de elasticidad con unidades de (Pa^{-1}) .

$$J(t) = \frac{Y}{\sigma}(t) \quad (1.5)$$

Un ejemplo de la respuesta en una prueba de fluencia se representa en la siguiente Figura 1.7.

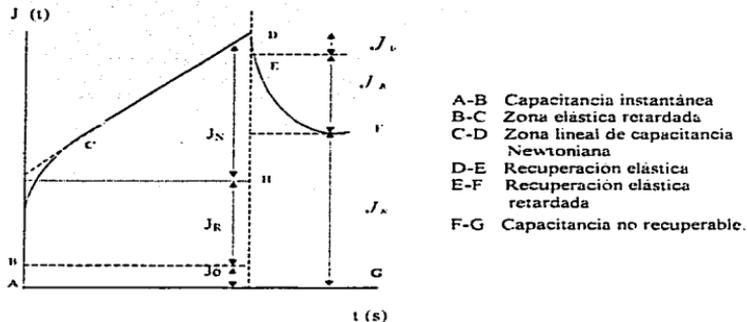


Figura 1.7 Curva representativa de un modelo de fluencia (Barbosa y col., 1989).

La relación de deformación-esfuerzo describe cuán complicada es una muestra al deformarse, a mayores valores de J , mayor facilidad para deformar una muestra. Mientras la muestra permanece en la región viscoelástica, el valor de J será independiente del esfuerzo aplicado.

En la misma Figura se representan la capacitancia instantánea (J_0), la capacitancia de retardo (J_r) y la capacitancia newtoniana (J_N) correspondientes en las curvas de fluencia-recuperación.

Con el fin de simular el comportamiento obtenido, el sólido elástico ideal (resorte) y el fluido newtoniano (pistón) se arreglan de diferentes formas (serie, paralelo) para obtener modelos mecánicos que representan el comportamiento de materiales reales. Los más comunes son los modelos de Maxwell (líquido viscoelástico) y Kelving-Voigt (sólido viscoelástico); que se muestran en la Figura 1.8.

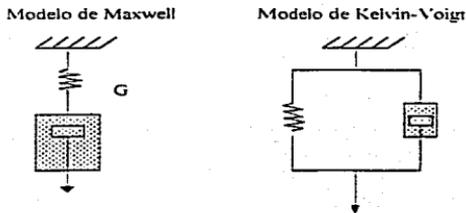


Fig. 1.8 Modelos de Maxwell y Kelvin (Steffe, 1995; Fiszman y col., 1983).

El modelo de Burgers, que representa mejor el comportamiento de muchos sólidos alimenticios, se obtiene agregando al modelo Kelvin-Voigt un elemento elástico y uno viscoso en serie. Esto permite escribir la ecuación (1.5) en términos de J referido al modelo de Burgers. Las respuestas de fluencia y recuperación en función del modelo de Burgers son por lo tanto:

$$J(t) = J_0 + J_1 \{1 - \exp(-t/\lambda_{ret})\} + \frac{t}{\eta_0} \quad \text{Fluencia} \quad (1.6)$$

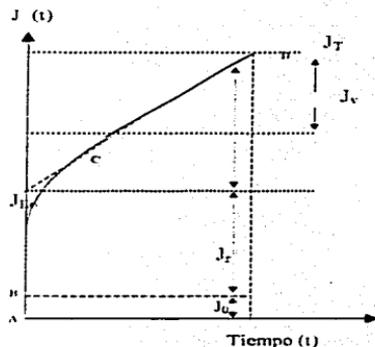
$$J(t) = J_1 \exp\left[-(t-t_1)/\lambda_{ret}\right] + \frac{t}{\eta_0} \quad \text{Recuperación} \quad (1.7)$$

donde $J_0 = 1/G_0$ es la relación de deformación-esfuerzo instantáneo denominada capacitancia instantánea. G_0 es el módulo elástico instantáneo, $J_1 = 1/G_1$ y $J_2 = 1/G_2$ son las relaciones de capacitancia con el comportamiento elástico retardado. $\lambda_1 = \eta_1/G_1$ y $\lambda_2 = \eta_2/G_2$ son los tiempos de retardo asociados con la elasticidad retardada; G_1 y G_2 son los módulos elásticos retardados asociados con la elasticidad retardada; η_1 y η_2 son los componentes de viscosidad asociados con la elasticidad retardada y η_N es la viscosidad asociada con el flujo newtoniano. Los parámetros de una prueba de fluencia pueden ser relacionados como un porcentaje de contribución de cada elemento del modelo mecánico de Burgers a la capacitancia total (Figura 1.9).

Donde:

J_T : Define la capacitancia total que es la relación de deformación-esfuerzo total con respecto al tiempo. Este parámetro representa la deformación total producida por el esfuerzo aplicado al alimento, durante un tiempo.

J_0 : Representa la capacitancia instantánea. Es la región A-B en la que el alimento exhibe un comportamiento puramente elástico de manera que al retirarse el esfuerzo antes de alcanzar el punto B, la muestra recuperaría su forma original.



- A-B Deformación instantánea
- B-C Zona elástica retardada.
- C-D Zona lineal de deformación newtoniana.

Figura 1.9 Contribución de cada elemento del modelo mecánico de Burgers a la capacitancia total en una curva de fluencia.

$J_{E,R}$: Este elemento representa la capacitancia del módulo elástico instantáneo más la capacitancia de la zona de retardo presentado por el material.

J_N : Representa la capacitancia correspondiente a la zona C-D en la región newtoniana que aumenta linealmente con el tiempo.

J_R : Representa la relación de deformación-esfuerzo de retardo, más allá de la zona B, la muestra no exhibe un comportamiento puramente elástico. Bajo la influencia del esfuerzo aplicado por períodos de tiempo prolongados, la estructura comienza a cambiar o a destruirse; siendo mayor en esta región. El patrón de destrucción es distinto para los materiales debido a que no

todos los enlaces dentro del alimento tienen la misma fuerza. Esta región está caracterizada por parámetros de elasticidad y viscosidad.

▪ **Relajación.**

b) En las pruebas de relajación, un material se somete a una deformación instantánea y el esfuerzo que se requiere para mantener la deformación es medido en función del tiempo. El resultado de la curvas depende de la combinación de la naturaleza elástica y viscosa del material a ser probado (Steffe,1995).



Figura.1.10 Curva de Relajación de Esfuerzo (Steffe, 1995).

El comportamiento de una prueba de relajación de esfuerzo se muestra en la Figura 1.10, en la cual se observa un material que no presenta relajación, correspondiente a un sólido elástico ideal, mientras que una sustancia viscosa ideal se relaja instantáneamente. Los materiales viscoelásticos se relajan gradualmente dependiendo de la estructura molecular del material que ha sido probado: esfuerzos en sólidos viscoelásticos decaen hacia un esfuerzo de

equilibrio ($\sigma_e > 0$), pero el esfuerzo residual en un líquido viscoelástico puede ser cero.

Los modelos que mejor describen a la mayoría de los alimentos sólidos, cuando se someten a pruebas de fluencia y relajación son el modelo de Burgers y el de Maxwell generalizado, respectivamente (Steffe, 1995).

▪ **Ensayos Oscilatorios:**

c) Otra manera para caracterizar los materiales viscoelásticos es por medio de ensayos oscilatorios, en los que la muestra se somete a un esfuerzo o deformación que varía en forma sinusoidal. Este procedimiento es comúnmente conocido como método dinámico para el estudio del comportamiento viscoelástico de los materiales.

Los resultados son muy sensibles a la composición química y la estructura física, por lo que son de gran ayuda para la caracterización de geles, el monitoreo de la gelatinización del almidón, el seguimiento de la coagulación y desnaturalización de las proteínas, la evaluación de la formación de la cuajada en los procesos de productos lácteos, el desarrollo de textura en productos cárnicos y de panadería, así como en pruebas de vida de anaquel, entre otras aplicaciones.

Para ilustrar la deformación oscilatoria, considérese dos placas rectangulares orientadas paralelamente una de la otra (Figura 1.11). La placa inferior se fija y la placa superior es destinada a moverse hacia atrás y hacia

adelante en una dirección horizontal, asumiendo que la muestra ha sido colocada entre las placas del dispositivo de control de velocidad (Steffe, 1995).

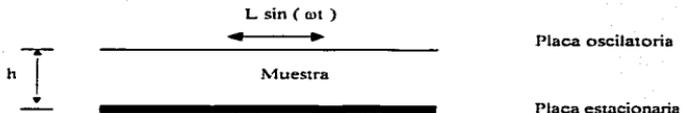


Figura 1.11 Deformación de cizalla oscilatoria entre placas rectangulares (Steffe, 1995)

Suponiendo que la deformación del material entre las placas es una función del tiempo definida como:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (1.8)$$

donde γ_0 es la amplitud de la deformación igual a L/h cuando el movimiento de la placa superior es $L \sin(\omega t)$. ω es la frecuencia expresada en rad/s equivalente a $\omega/(2\pi)$ en Hertz.

El período para completar un ciclo es igual a $2\pi/\omega$. Si las dos placas estuvieran separadas por una distancia de 1.5 mm y la placa superior se desplaza a 0.3 mm desde el centro de la línea, entonces la amplitud máxima de deformación puede ser calculada como 0.2 ó 20 %: $\gamma_0 = L/h = 0.3/1.5 = 0.2$.

Los efectos del cambio de la amplitud y frecuencia con respecto a la deformación se ilustran en la Figura 1.12.

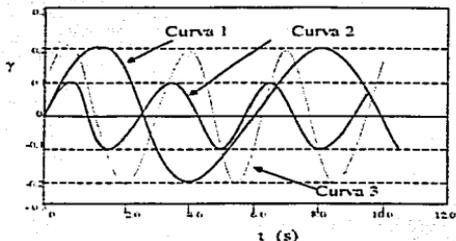


Figura 1.12 Cambio de la deformación en función a la variación de frecuencia y la amplitud de deformación: Curva 1) $\gamma_0 = 0.2$, $\omega = 1$ rad/s; Curva 2) $\gamma_0 = 0.1$, $\omega = 2$ rad/s; Curva 3) $\gamma_0 = 0.2$, $\omega = 2$ rad/s (Steffe, 1995).

Duplicando la amplitud desde 0.1 (Curva 2) a 0.2 (Curva 1 ó Curva 3) la altura de la curva es mayor. Duplicando la frecuencia desde 1 rad/s (Curva 1) a 2 rad/s (Curva 2 ó Curva 3) reduce por la mitad el tiempo entre los picos de las dos curvas.

Se encontró la deformación en una función sinusoidal resultante a una velocidad de cizalla periódica por la derivación de la ecuación (1.8) teniendo:

$$\frac{dy}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{d(\gamma_0 \text{sen}(\omega t))}{dt} \quad (1.9)$$

la cual puede ser evaluada como:

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t) \quad (1.10)$$

con una amplitud de deformación pequeña (por lo que el material puede comportarse en una manera viscoelástica lineal), por lo tanto el esfuerzo de cizalla es producido por cambio de la deformación:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (1.11)$$

donde σ_0 es la amplitud del esfuerzo de cizalla y δ es la fase de retardo o fase de cambio (conocida también como el ángulo mecánico de fase) relativo a la deformación. El periodo de tiempo asociado con la fase de retardo o de la fase es igual a δ/ω . σ_0 puede ser sin embargo el pico de fuerza por unidad de área recibida por la placa estacionaria (Figura 1.3). Dividiendo ambos lados de la ecuación (1.11) por γ_0 ,

$$\frac{\sigma}{\gamma_0} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin(\omega t - \delta) \quad (1.12)$$

El resultado de una prueba oscilatoria de pequeña amplitud puede ser descrita por el cociente de la amplitud $\frac{\sigma_0}{\gamma_0}$ y el desfaseamiento (δ) como una función dependiente de la frecuencia.

El esfuerzo de cizalla producido por una deformación sinusoidal puede

ser escrito como:

$$\sigma = G' \gamma + (G''/\omega) \dot{\gamma} \quad (1.13)$$

y en términos de las viscosidades como:

$$\eta = \sigma = \gamma_0 [G' \sin(\omega t) + G'' \cos(\omega t)] \quad (1.14)$$

G' (conocido como módulo de rigidez o almacenamiento) que representa la parte elástica del material, y G'' (conocido como módulo de pérdida) que representa su carácter viscoso, ambos como una función de la frecuencia y pueden ser expresados en términos de la amplitud como:

$$G' = (\sigma_0 / \gamma_0) \cos \delta \quad (1.15)$$

y

$$G'' = (\sigma_0 / \gamma_0) \sin \delta \quad (1.16)$$

Otras funciones materiales dependientes de la frecuencia son: el módulo complejo (G^*), la viscosidad compleja (η^*), la viscosidad dinámica o componente viscosa (η') y la viscosidad compleja de desfase o componente elástica (η''):

$$G^* = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (1.17)$$

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2} \quad (1.18)$$

$$\eta' = \frac{G''}{\omega} \quad (1.19)$$

$$\eta'' = \frac{G'}{\omega} \quad (1.20)$$

Usando la ecuación (1.19) y la ecuación (1.13), el esfuerzo puede expresarse como:

$$\sigma = G' \gamma + \eta' \dot{\gamma} \quad (1.21)$$

Relación excelente para representar el comportamiento de un material porque indica claramente la naturaleza elástica ($G' \gamma$) y viscosa ($\eta' \dot{\gamma}$) de una sustancia.

Otra función del material usada para describir el comportamiento viscoelástico es la tangente o la fase de cambio o ángulo de fase (llamado también tangente delta) que también es una función de la frecuencia:

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad (1.22)$$

Este parámetro está directamente relacionado con la pérdida de energía por ciclo dividida por la energía almacenada por el ciclo. Desde $0 < \delta < \pi/2$, tan δ puede variar de cero al infinito (Steffe, 1995).

Las pruebas oscilatorias se pueden realizar por tensión, compresión o cizalla utilizando accesorios de placas paralelas, cono y placa o cilindros

concéntricos. Los instrumentos típicos operan en el modo de control de la deformación de cizalla aunque también existen instrumentos oscilatorios que pueden controlar el esfuerzo.

Se ha sugerido que un barrido de esfuerzos produce mejores resultados, sin embargo, ambos barridos de esfuerzo o de deformación proveen una base de comparación de la naturaleza viscoelástica de los productos alimenticios (Holland,1994).

Un barrido de deformación o de esfuerzo, a un valor de frecuencia constante, se utiliza para determinar los límites del comportamiento viscoelástico lineal conocida como la región de viscoelasticidad lineal, en donde las propiedades reológicas no dependen de la deformación o del esfuerzo. Los módulos de almacenamiento y de pérdida en un barrido de esfuerzo o de deformación se muestran en la Figura 1.13.

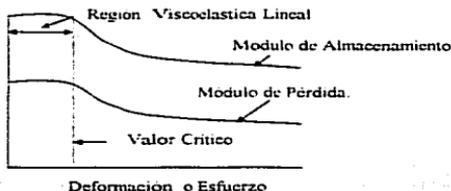


Figura. 1.13 Respuesta típica a un barrido de esfuerzo o deformación mostrando la zona viscoelástica lineal definida por un valor crítico del barrido (Steffe, 1995).

El barrido de frecuencia es probablemente el modo más común en una prueba oscilatoria debido a que muestra como cambia el comportamiento elástico (G') y viscoso (G'') de un material con respecto a la velocidad angular. En esta prueba, la frecuencia se incrementa mientras la señal de la amplitud (esfuerzo o deformación) se mantiene constante.

Generalmente a altas frecuencias, los materiales exhiben características más cercanas a un sólido:

Para entender mejor los parámetros viscoelásticos definidos anteriormente, es útil ver el comportamiento de un material (Figura 1.14) solamente hookeano o solamente newtoniano. Si un material es un sólido hookeano (a), el esfuerzo y la deformación están en fase y $\delta = 0$.

Por lo tanto, G'' y η' son también igual a cero debido a que no hay disipación de energía viscosa. En este caso, G' es una constante igual al módulo de cizalla (G). Si un material se comporta como un fluido newtoniano (b), el esfuerzo (Ec. 1.11) y la deformación (Ec. 1.8) están 90 grados fuera de fase ($\delta = \pi/2$): por lo tanto la velocidad de cizalla (Ec. 1.10) también está 90 grados fuera de la fase con respecto al esfuerzo de cizalla.

En este caso G' y η'' son cero debido a que el material no almacena energía. Entonces, η' es constante e igual a la viscosidad newtoniana (η). Un comportamiento similar es frecuentemente observado en fluidos no-newtonianos en una frecuencia cercana a cero (Steffe, 1995; Fiszman y col., 1983).

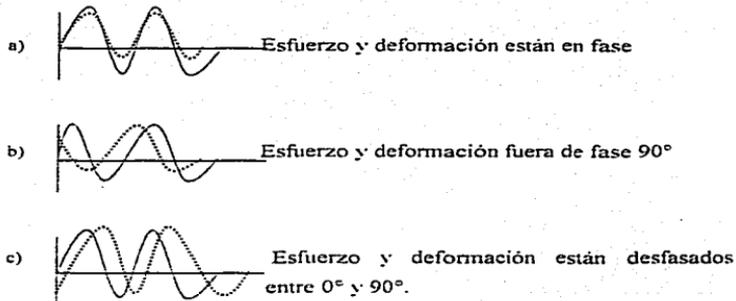


Figura 1.14 Respuesta sinusoidal de un sólido (a), líquido (b) y un material viscoelástico (c) esfuerzo (—), deformación (---) (Fizman y col., 1983).

CAPITULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS COMERCIALES.

Para analizar la respuesta de los cinco diferentes alimentos comerciales con características de semisólidos tipo untable, se seleccionaron una crema de cacahuete, una crema de avellana, un queso fundido, un betún de chocolate y una cajeta. La formulación y la composición expresada en porcentaje de acuerdo a lo reportado en la etiqueta del producto se presentan en los cuadros 2.1 y 2.2 respectivamente.

Cuadro 2.1 Formulación de los productos estudiados.

Producto	Formulación	Marca
Queso Fundido	Queso madurado (Tipo cheddar y/o gouda y/o edam y/o egmont; Leche, cultivos lácticos, sal y enzimas), agua, suero de queso, crema de vaca, sales fundentes, leche descremada en polvo, sal yodada, ácido cítrico, harina de mostaza, colorantes naturales y 0.1 % de sorbato de potasio	Kraft Foods de México
Betún de Chocolate	Azúcar, agua, aceite de soya y/o algodón (parcialmente hidrogenado), jarabe de maíz, cocoa, almidón de trigo, sal, monoglicéridos, polisorbato 60, saborizantes naturales y artificiales, estearoil lactilato de sodio, pirofosfato ácido de sodio, ácido cítrico, licor de chocolate, leche descremada y sorbato de potasio	Betty Crocker
Crema de Cacahuete	Cacahuates tostados, azúcar, aceite vegetal hidrogenado (aceite de canola, aceite de algodón y/o aceite de soya), sal y emulsificantes	Aladino de Pronto
Crema de Avellana	Azúcar, grasas vegetales, avellanas (15 %), leche descremada en polvo (0 %), cocoa, emulgente (lecitina) y esencia de vainilla	Nutela de Ferrero
Cajeta	Leche de cabra, azúcar y glucosa	Coronado

Cuadro 2.2 Composición química calculada de los productos en estudio.

Producto	Proteínas	Grasa total	Sólidos no grasos	Carbohidratos	Humedad
Queso Fundido	12.0	20.0	25.0	13.0	55.0
Betún de Chocolate	1.4	15.6	66.1	64.7	18.3
Crema de Cacahuete	25.0	50.0	46.8	21.8	3.2
Crema de Avellana	6.5	31.0	63.5	57.0	5.5
Cajeta	4.81	7.31	75.5	70.7	17.15

El pH determinado en un potenciómetro (Conductronic pH 120) y la densidad obtenida por picnometría de las muestras se resume en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.3 Valores de pH y densidad obtenidos para cada uno de los productos en estudio.

Producto	Densidad (g/mL)	pH
Queso Fundido	1.058	5.94
Betún de Chocolate	0.9980	5.65
Crema de Cacahuete	0.9989	6.11
Crema de Avellana	1.1296	6.26
Cajeta	1.268	5.76

Valores obtenidos experimentalmente con un coeficiente de variación menor al 10 %.

2.2 MUESTREO

La selección de la muestra se efectuó a través de un muestreo aleatorio simple, en donde a partir de una población de N unidades se seleccionó una, dando igual probabilidad a todas las unidades. Se procedió con la ayuda de una tabla de números aleatorios, presentado como:

$$C_n^N = \frac{N!}{n!(N - n)!}$$

Donde : N = población. n = muestra.

La prueba consistió en tomar aleatoriamente en el centro comercial 10 envases de cada uno de los productos, con la misma fecha de caducidad, lote y hora de producción. Se acomodaron en dos columnas y se aplicó la fórmula anterior para la selección de 3 muestras representativas.

El muestreo aleatorio es un procedimiento simple si la población no es grande y si es relativamente fácil y barato encontrar las unidades de muestreo, considerando que la población debe ser numerada (Navarro y col., 1998).

2.3 DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS

2.3.1 Pruebas texturales

- **Perfil de textura:**

Las pruebas de perfil de textura se llevaron a cabo en un analizador de textura TA.XT2 "Texture Analyser" (Estados Unidos de Norteamérica) para cada uno de los productos. Esta prueba consistió en comprimir y descomprimir dos veces la muestra con un cilindro de acrílico, simulando la masticación. Las dimensiones del recipiente plástico en donde se transvasó la muestra fueron de 5.4 cm de ancho x 6.7 cm de alto, ésta cubrió el recipiente hasta una altura de 4 cm y se dejó reposar durante 5 min a fin de que la muestra fuera homogénea y tuviera las mismas condiciones. La prueba se realizó a temperatura ambiente de 24 \pm 1 °C.

Se utilizó como dispositivo un cilindro de acrílico de 25.4 mm, la fuerza con la cual el sensor hizo contacto con la muestra fue de 10 g y el tiempo de espera entre el primer ciclo de compresión fue de 5 s. La velocidad de acercamiento a la muestra fue de 2 mm/s, la velocidad durante la prueba fue de 2 mm/s y la velocidad a la que se retiró el sensor de la muestra fue de 5 mm/s, teniendo como respuesta la curva típica de fuerza-tiempo.

Las pruebas se realizaron por triplicado para cada producto y a los resultados obtenidos se les aplicó un tratamiento de datos simple (promedio, varianza, desviación estandar y porcentaje del coeficiente de variación) e intervalos de confianza a un 95 % de probabilidad (Snedecor.. 1984).

La curva típica del perfil de textura y los parámetros texturales que se obtienen se muestran en el Capítulo 1 en la Figura 1.1.

- **Pruebas de fatiga cíclica.**

Esta prueba consistió en hacer 10 penetraciones cíclicas a una muestra. Se utilizó un recipiente cilíndrico de plástico de 5.4 cm de diámetro por 6.7 cm de altura. Se colocó muestra hasta una altura de 4 cm del recipiente plástico. El mismo cilindro acrílico se introdujo 1 cm dentro de la muestra y se dejó reposar 5 min transcurridos los cuales se corrió la prueba que consistió en que el dispositivo recorriera 1 cm hacia arriba y hacia debajo de su posición original a una velocidad de 1 mm/s, 10 veces a fin de someter a la muestra a un proceso de cizallamiento, obteniéndose la fuerza positiva máxima en cada ciclo. el área bajo la curva (en cada ciclo) y el porcentaje de pérdida de fuerza entre el primer y el último ciclo de la compresión. La curva representativa de este tipo de prueba se muestra en la Figura 1.2.

Las pruebas se realizaron a una temperatura de 24 ± 1 ° C.. por triplicado y a los resultados obtenidos se les efectuó el mismo tratamiento de datos (promedio, varianza, desviación estandar, porcentaje del coeficiente de variación) e intervalos de confianza con un 95 % de probabilidad.

2.3.2. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

Se realizaron tres tipos de mediciones:

- **Pruebas de cizalla estacionaria**

Para cuantificar el comportamiento al flujo se utilizó el reómetro Haake RT 20 (Alemania). Debido a las características de los materiales (alta viscosidad y alto contenido de grasa) se utilizaron cuatro diferentes tipos de geometrías que incluye dos rugosidades diferentes, una no convencional y una geometría lisa, con el fin de evitar el deslizamiento. Las cuales se describen a continuación:

- 1- La geometría rugosa placa-placa, con un diámetro de 35 mm. Se varió el espacio entre placas de 0.5, 1.0, 2.0 y 3.0 mm con el fin de observar el posible deslizamiento del producto.
- 2- La geometría lisa placa-placa, con un diámetro de 60 mm y un espacio entre placas de 0.5, 1.0, 2.0 y 3.0 mm.

Estas pruebas consistieron en colocar una cierta cantidad del material de estudio en el centro de la placa inferior y posteriormente el instrumento ajustó la placa hasta el espacio deseado. Se retiró el exceso de muestra y se dejó reposar durante 5 minutos a fin de estabilizar la temperatura ambiente (24 ± 1 °C) y posteriormente se procedió a la medición aplicando un esfuerzo de cizalla y midiendo la velocidad de cizalla correspondiente.

- 3- La geometría de paletas, con un diámetro de 40 mm y una altura de 55 mm. Esta prueba consistió en colocar la muestra en un envase comercial de dimensiones de 8.12 cm de diámetro por 7.4 cm de alto 24 h previas a la medición. La paleta se colocó cuidadosamente dentro del envase. Se aplicó un torque aumentando progresivamente y se registró la velocidad de rotación de la paleta.

- 4- La geometría lisa de cono y placa, con un diámetro de 60 mm y un espacio entre cono-placa de 0.5 mm. A ésta se le aplicó un recubrimiento con arena, el cual consistió en cubrir la geometría con un barniz transparente sobre la placa y el cono. Posteriormente se cubrieron con arena de piedra pómez previamente tamizada por una malla de 100 micras, con el fin de crear en la geometría una cubierta rugosa y evitar así el deslizamiento. La colocación de la muestra fue igual a la reportada en las pruebas (1 y 2).

Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente a 24 ± 1 ° C verificándose al inicio y final de la prueba y por quintuplicado como mínimo.

▪ Pruebas de Fluencia

Se mantuvo un esfuerzo de cizalla constante y se midió la deformación resultante en función del tiempo. Esta prueba también se realizó utilizando el reómetro Haake (RT 20) con la geometría rugosa de placa-placa, con las siguientes características: diámetro de 35 mm y un espacio entre placas de 0.5 mm.

La muestra se colocó de manera similar a la prueba de cizalla

estacionaria. El esfuerzo aplicado a cada uno de los productos fue de 20 Pa, todos a temperatura ambiente (24 ± 1 °C), por quintuplicado y se les aplicó el mismo tratamiento de datos.

▪ **Pruebas de cizalla oscilatoria**

Para la determinación del espectro mecánico se utilizó el reómetro Haake RT20 con las geometrías de placa-placa lisa de diámetro de 60 mm y una rugosa de diámetro de 35 mm ambas con un espacio entre placas de 3.0 mm.

a) La muestra se colocó de la misma manera que en la prueba de cizalla estacionaria y se realizó un barrido de esfuerzo para determinar la zona viscoelástica lineal aplicando una frecuencia constante de 1 Hz (6.28 rad/s). Esta prueba se realizó por triplicado y a temperatura ambiente de 24 ± 1 °C.

b) Se seleccionó un esfuerzo dentro de la zona viscoelástica lineal y se realizó un barrido de frecuencia para la obtención del espectro mecánico de los módulos (G') elástico, (G'') viscoso, así como la viscosidad compleja (η^*) para cada uno de los materiales. Se realizó un promedio de los parámetros viscoelásticos a cada una de las frecuencias estudiadas, y se calculó la desviación estandar y el porcentaje del coeficiente de variación. Se eligieron las tres curvas más próximas al promedio. El análisis se realizó sobre esta curva promedio.

3.1 PRUEBAS TEXTURALES

3.1.1 Perfil de Textura

En la Figura 3.1 se muestra una curva representativa del perfil de textura de cada material estudiado. Se observan perfiles de textura característicos de semisólidos semejantes a los reportados en el queso fundido (Bourne., 1978, 1981). Se puede observar que los cinco productos se deforman fácilmente, tienden más a comprimirse que a romperse debido a que no presentan fracturabilidad pero si una considerable adhesividad (área bajo la curva del primer ciclo de compresión) y una moderada cohesividad.

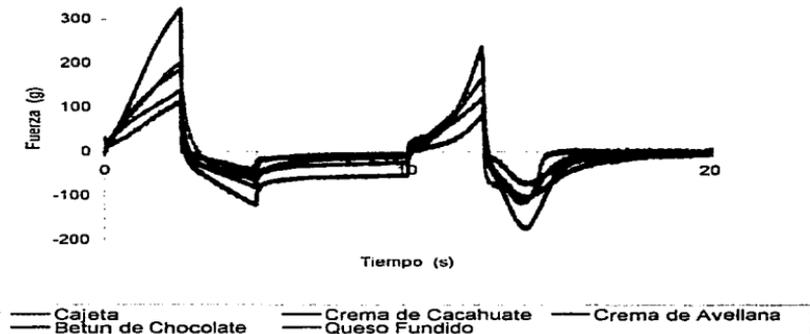


Figura 3.1 Perfil de textura de los materiales en estudio.

Los parámetros texturales obtenidos por cada uno de los materiales se discuten a continuación:

- DUREZA

La dureza fue calculada como la fuerza necesaria que se requiere para comprimir un producto una distancia dada en el perfil de textura. Los resultados que se obtuvieron se presentan en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Valores promedio de dureza obtenidos en el de perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.

	Crema de Cacahuete	Queso Fundido	Betún de Chocolate	Cajeta	Crema de Aveliana.
Dureza 1 (g.)	338.74 = 38.7	198.12 = 6.06	178.12 = 7.06	154.40 = 17.5	116.09 = 3.07
C.V. (%)	10.1	2.7	3.8	10.0	2.5

Se observa que la crema de cacahuete presentó el pico de fuerza máximo (dureza) superior en comparación con los demás productos (Figura 3.1). El queso fundido, el betún de chocolate, la cajeta y la crema de aveliana presentaron una menor fuerza promedio, respectivamente, obteniéndose un coeficiente de variación cercano al 10 %. En el mismo cuadro se muestra la variación del promedio que permite calcular los intervalos de confianza, de lo cual se constató que los productos presentaron el mismo orden decreciente.

Se calculó también la pendiente al inicio de la curva de ascenso en el primer ciclo de compresión, obteniendo la misma tendencia que en los resultados de

dureza, pero se cuantificaron coeficientes de variación mayores, por lo que se decidió no reportar este valor, ya que es más representativo para materiales sólidos.

• **COHESIVIDAD**

La cohesividad es la medición del grado de dificultad que presenta un producto para la ruptura de su estructura interna (Sanderson, 1990). Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2 Valores promedio de cohesividad obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.

	Cajeta	Queso Fundido	Betún de Chocolate	Crema de Cacahuete	Crema de Avellana.
Cohesividad	0.729 = 0.01	0.637 = 0.005	0.6 = 0.008	0.479 = 0.02	0.457 = 0.022
C.V. (%)	1.19	0.56	1.13	3.61	4.54

Este valor como se menciona en el Capítulo 1, es un indicador del grado de destrucción del material que ocasiona la primera compresión antes de romperse.

Entre el betún de chocolate, la crema de cacahuete y la crema de avellana, el más cohesivo fue el betún. La crema de avellana y cacahuete fueron muy similares.

En el caso del queso fundido, fue el segundo más cohesivo después de la cajeta la cual reportó el valor más alto de cohesividad con un comportamiento aparentemente más cohesivo en comparación con los demás productos. La cohesividad puede tener una diferente interpretación para semisólidos que para

sólidos. Para los primeros es más recomendable obtener información de las propiedades cohesivas y adhesivas por medio de pruebas específicas.

• ADHESIVIDAD

Los resultados y los coeficientes de variación obtenidos para los parámetros de adhesividad y fuerza adhesiva se muestran en el cuadro 3.3. La adhesividad se considera como el trabajo necesario para remover el material que se adhiere en la boca durante el proceso normal de masticación y en la curva de perfil de textura se calcula como el área negativa entre el primero y segundo ciclos de compresión, la fuerza adhesiva se define como la fuerza máxima negativa obtenida durante el primer ciclo de compresión (Sánchez, 1996). Se puede observar que los valores de adhesividad en la cajeta presentaron mayores coeficientes de variación comparados con los valores de fuerza adhesiva que fue cercano al 10 % pero mantuvieron la misma tendencia, considerando que en la cajeta el intervalo de confianza fue mayor después de la crema de cacahuete.

Los valores reportados de fuerza adhesiva mostraron que durante el primer ciclo de compresión, la crema de cacahuete presentó la mayor fuerza negativa de adhesión, seguida del benín de chocolate, el queso fundido, la cajeta y la crema de avechana respectivamente.

Cuadro 3.3. Valores promedio de adhesividad y fuerza adhesiva obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.

	Crema de Cacahuate	Betún de Chocolate	Queso Fundido	Cajeta	Crema de Avellana
Adhesividad (g*s)	-192.6 = 24.7	-103.1 = 2.95	-77.9 = 2.44	-82.62 = 12.6	-63.63 = 5.21
C.V. (%)	11.33	2.5	2.75	13.45	7.2
Fuerza Adhesiva	-138.191 = 18.25	-78.049 = 4.01	-66.799 = 1.34	-55.405 = 6.54	-50.05 = 2.73
C.V. (%)	11.7	4.5	1.7	10.4	4.8

Si bien el perfil de textura permitió determinar los valores de adhesividad para los materiales en estudio, debido a que éstas propiedades son muy importantes en este tipo de productos, se propone efectuar pruebas de adhesividad más específicas que permitan evaluar de manera más precisa las propiedades cohesivas y adhesivas de estos materiales.

• ELASTICIDAD

Es el grado en el cual un producto recobra su forma original después de haber sufrido una deformación durante el proceso de masticación. Los resultados de elasticidad se determinaron basándose en el índice de elasticidad establecido por el perfil de textura.

Cuadro 3.4. Valores promedio del índice de elasticidad obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.

	Crema de Avellana	Crema de Cacahuat	Berún de Chocolate	Queso Fundido	Cajeta
Índice de Elasticidad	1.0 = 0.0023	0.963 = 0.0045	0.9946 = 0.0056	0.9926 = 0.011	1.006 = 0.007
C.V. (%)	0.2	0.4	0.5	1.0	0.7

Del cuadro 3.4. se puede decir que en los cinco productos no existe una diferencia importante entre cada uno de ellos, ya que estos valores son parecidos entre sí y cercanos a la unidad. lo que indica que el material se recupera casi en su totalidad. efecto que es más evidente en un material sólido (una gomita, queso o pan): características que no se presentan en este tipo de materiales en los que sus propiedades son de semisólidos, con una apariencia suave y untable, por lo que este parámetro no resulta representativo para estos materiales.

- GOMOSIDAD

La Gomosidad es definida como el trabajo necesario para desintegrar un alimento semisólido hasta el punto en el que pueda ser deglutido durante la masticación. Es el producto de la dureza por la cohesividad.

Del cuadro 3.5. se puede observar que en orden decreciente, el valor más alto fue para la crema de cacahuat, seguido del queso fundido, la cajeta, el berún de chocolate y la crema de avellana.

Cuadro 3.5. Valores promedio de gomosisidad obtenidos en el perfil de textura para cada uno de los materiales en estudio.

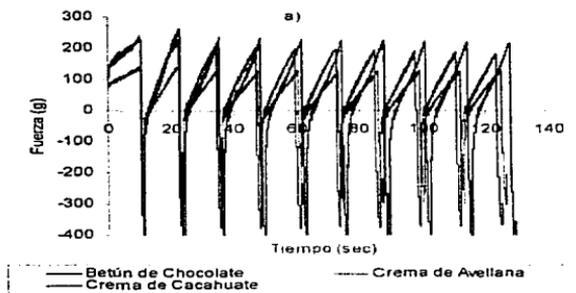
	Crema de Cacahuate	Queso Fundido	Cajeta	Betún de Chocolate	Crema de Avellana
Gomosisidad (g.)	162.3 = 19.06	126.2 = 3.34	112.7 = 13.37	106.8 = 3.77	53.1 = 1.38
C.V. (%)	10.4	2.5	10.5	5.1	2.3

La crema de cacahuate que fue considerablemente más dura que los demás productos, fue también la más gomosa. La dureza fue más determinante en esta propiedad que la cohesividad, ya que los productos mostraron la misma tendencia en gomosisidad y en dureza, a excepción de la cajeta y el betún de chocolate siendo la cajeta más gomosa que el betún por haber sido la más cohesiva, aún cuando el betún fue un poco más duro.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.1.2 Prueba de fatiga cíclica.

En la Figura 3.2 se presentan las curvas características de los materiales estudiados. Se incluye la curva de la crema de cacahuete en ambas con la finalidad de tener el mismo punto de comparación en el gráfico.



En el gráfico se puede observar que el material semisólido al ser sometido a un trabajo sucesivo de cizallamiento presenta una disminución de la fuerza máxima cuantificada en cada uno. Todos los materiales presentaron un porcentaje de pérdida de fuerza alrededor del 25 % (exceptuando la crema de cacahuete) y un coeficiente de variación menor al 10 %. La crema de cacahuete reportó el valor más pequeño de pérdida de fuerza y el mayor de coeficiente de variación.

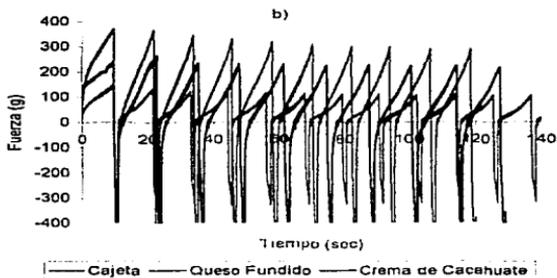


Figura 3.2 Pruebas de fatiga cíclica en los materiales de estudio. a) Crema de avellana, crema de cacahuete y betún de chocolate. b) Crema de cacahuete, queso fundido y cajeta.

Antes del inicio de la prueba el cilindro acrílico se coloca en el centro aproximadamente 1 cm dentro de la muestra, por lo que la dureza máxima o resistencia a la penetración ya fue afectada y en consecuencia no coincide con la dureza máxima obtenida en el perfil de textura.

El cuadro 3.6 resume los porcentajes presentados por cada uno de los materiales en estudio.

Cuadro 3.6. Valores promedio del porcentaje de pérdida de fuerza obtenidos para cada uno de los materiales de estudio en la prueba de fatiga cíclica.

Producto	Porcentaje (%)	C.V. (%)
Crema de Avellana	28.11	8.26
Cajeta	26.2	8.53
Queso Fundido	26.0	6.98
Betún de Chocolate	22.2	0.62
Crema de Cacahuete	7.3	9.56

La crema de avellana exhibió el mayor porcentaje de pérdida de fuerza. El betún de chocolate mostró el porcentaje más pequeño después de la crema de cacahuete y el queso fundido reportó un porcentaje de pérdida muy similar a la cajeta, pero mayor que el betún de chocolate.

Por último la cajeta presentó un alto porcentaje de pérdida siendo menor al de la crema de avellana y relativamente mayor al queso fundido.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3.2 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

3.2.1 Pruebas de cizalla estacionaria.

Geometría 1: Rugosa placa-placa, con un diámetro 35 mm.

Los resultados que se obtuvieron del comportamiento al flujo de los productos en estudio con la geometría (1), variando de 0.5 mm, 1.0, 2.0 y 3.0 mm el espacio entre las placas, no presentaron repetibilidad y el porcentaje del coeficiente de variación en cada uno de los parámetros al momento de su análisis fue muy alto.

Lo anterior puede explicarse en función del intervalo de esfuerzo de cizalla aplicado, ya que el esfuerzo mínimo permitido por el instrumento para esta geometría es de 40 Pa. Además, durante las pruebas, el betún de chocolate, la crema de avellana y la crema de cacahuete, presentaron un deslizamiento evidente, así como la salida de la muestra a altos esfuerzos. En el caso del queso fundido a temperatura ambiente y con la geometría rugosa, al llegar a un esfuerzo mayor de 100 Pa no fluía y se formaban grumos dentro de la placa, por lo que se decidió aumentar la temperatura a 40°C, sin embargo, los resultados no se mejoraron para este producto.

En la prueba realizada con esta geometría rugosa a la cajeta, fue la única que no presentó deslizamiento evidente, permitiendo así obtener su comportamiento al flujo a muy bajas velocidades de cizalla, además de que los datos y las repeticiones realizadas fueron homogéneas. En la figura 3.4 (e) se puede observar el comportamiento presentado por este producto con la geometría (1), el cual no

presenta un esfuerzo de fluencia, en comparación con las demás muestras. En la cajeta se puede observar que el máximo esfuerzo aplicado fue de 140 Pa, con un comportamiento fluidificante del tipo ley de la Potencia.

Geometría 2: Lisa placa-placa, con un diámetro de 60 mm.

Posteriormente se utilizó con este mismo instrumento, la geometría (2) variando de igual manera el espacio entre placas de 0.5, 1.0 y 3.0 mm, para determinar el comportamiento al flujo de estos materiales en intervalos de esfuerzos de cizalla más pequeños, ya que en esta geometría, el instrumento permite la aplicación de esfuerzos de cizalla a partir de 7.5 Pa.

Los resultados en esta geometría presentaron un comportamiento muy similar a los obtenidos con la placa rugosa pero a diferencia de ésta, en la placa lisa aún variando el espacio entre las placas se observó un mayor deslizamiento. En los datos obtenidos de las cinco repeticiones realizadas para cada uno de los productos se observaron tendencias similares a las obtenidas con la placa rugosa con un espacio entre placas de 0.5 mm.

La cajeta fue el único producto que al inicio de la prueba (bajos esfuerzos de cizalla) presentó un comportamiento similar al obtenido con la geometría rugosa, pero al incrementar el valor de esfuerzo, la muestra se salió del espacio que ocupaba.

Geometría 3: Paleta.

Debido a que no se contaba con más geometrías de tipo placa-placa que permitieran continuar con la evaluación, se optó por el empleo de la geometría de paleta, como una alternativa para obtener el esfuerzo de fluencia directamente. Se realizaron las pruebas para cada uno de los materiales en estudio, excepto la cajeta, pues en las pruebas anteriores (placa rugosa PP 35) ya se había obtenido la homogeneidad en sus repeticiones, el comportamiento al flujo y el modelo reológico, además de no haber presentado esfuerzo de fluencia. A los otros productos se aplicaron los mismos intervalos de esfuerzo que en las geometrías anteriores. Los resultados que se obtuvieron en esta prueba, fueron incongruentes debido a que la velocidad angular ($\text{rad}\cdot\text{s}$) medida en función del torque (Nm) aplicado variaba mucho más que en las pruebas anteriores, por lo que los resultados no fueron representativos.

Es importante mencionar que al colocar la paleta (cuidadosamente) en los semisólidos estudiados, la muestra en algunas ocasiones no cubría completamente la paleta (se formaba un hueco cercano al centro de la misma), generando una fuente de error experimental.

Geometría 4: Lisa de cono y placa, con un diámetro de 60 mm.

Por último se utilizó la geometría (4) con el fin de crear en las placas una cubierta rugosa que permitiera disminuir el deslizamiento presentado por los materiales. Citerne y col., (2001) realizaron un estudio similar a este trabajo para determinar las propiedades reológicas de una crema de cacahuete, la diferencia entre lo estudiado por Citerne radica en el tipo de material rugoso aplicado.

Las pruebas fueron realizadas bajo las mismas condiciones de esfuerzo que en la geometría 2 con un espacio de 0.5 mm. Los resultados que se obtuvieron fueron los mejores de toda la experimentación, ya que se logró disminuir en mayor proporción el deslizamiento entre las placas.

La evaluación del comportamiento al flujo de estos cinco semisólidos presentó gran dificultad experimental debido a las características propias de los materiales, así como su contenido graso, lo que influyó en gran medida en la determinación de los parámetros reológicos de cada uno de los materiales en estudio. La implementación de una superficie rugosa redujo en mayor proporción el efecto de deslizamiento presentado por estos materiales, pero no se eliminó en su totalidad, lo que pudo generar una variación experimental en los datos obtenidos entre cada una de las repeticiones aplicadas a estos materiales.

El comportamiento reológico de los materiales se puede observar en la Figura 3.4 (a, b, c y d), donde se presentan las curvas de flujo más representativas de las replicas realizadas a cada uno de los productos restantes como fueron el betún de chocolate, la crema de avellana, la crema de cacahuete y el queso fundido y se presenta superpuesta la función del comportamiento presentados por estos mismos. Los cinco productos presentaron un comportamiento de tipo no-Newtoniano. Los valores obtenidos de velocidades de cizalla, $\dot{\gamma}$, de todos los materiales estudiados fueron muy pequeños e inferiores a 10 s^{-1} para asegurar que no hubiera deslizamiento.

En la Figura 3.3 se muestran las curvas promedio obtenidas de la dependencia de la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla con las dos geometrías rugosas, donde se puede observar que todos los materiales presentan viscosidades aparentes muy altas que disminuyen en forma logarítmica, comportamiento fluidificante a la cizalla representativo del modelo de la potencia ($\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$)

Se observa superposición de resultados en la crema de cacahuete con las dos geometrías rugosas utilizadas (1 y 4), curvas muy cercanas en la crema de avellana y el betún de chocolate; y una gran diferencia en el queso fundido.

Los datos experimentales con la geometría 4 se ajustaron a diferentes modelos matemáticos que permitieran definir el comportamiento reológico. Primeramente se efectuó un análisis para un modelo de flujo tipo Casson ($\sqrt{\sigma} = \sqrt{\sigma_0} - K_C \sqrt{\dot{\gamma}}$). Se observó que sólo al inicio de la prueba prevalecía este comportamiento.

Posteriormente se aplicó un modelo del tipo ley de la potencia. Este análisis mostró que sólo en la zona intermedia de la prueba (datos experimentales) el material mantenía este tipo de comportamiento. Se aplicó la corrección de esfuerzo de cizalla en placas paralelas correspondiente a este modelo (Steffe, 1995), los parámetros de la ley de la potencia se resumen en el cuadro 3.11.

Finalmente el último modelo aplicado fue para un fluido del tipo Herschel-Bulkley. Este mostró que en la zona final de la prueba, los materiales en estudio se ajustaron en mayor proporción a la curva; además que los datos experimentales y el coeficiente de variación mostraron una mejor repetibilidad y homogeneidad para este comportamiento.

Se seleccionó el modelo del tipo Herschel-Bulkley, debido a que este presentó el menor coeficiente de variación así como la mejor tendencia de la curva ajustada sobre el gráfico. El cuadro 3.10 presenta un resumen de las condiciones de evaluación (geometría, espacio entre placas y tipo de prueba) al que fue sometido cada uno de los materiales. El cuadro 3.11 muestra los parámetros obtenidos para los fluidos de la potencia y Herschel Bulkley de índices de comportamiento al flujo (n), los índices de consistencia (K), coeficientes de correlación (r), intervalos de velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) y umbral de fluencia (σ_0) del modelo Herschel Bulkley, de los productos estudiados.

Cuadro 3.7 Condiciones y geometrías seleccionadas en la prueba de cizalla estacionaria para los materiales en estudio.

Producto	Geometría	Espacio/ placas (mm)	Tipo de Prueba
Berún de Chocolate	PP 60 lisa	0.5	P. con Arena
Queso Fundido	PP 60 lisa	0.5	P. con Arena
Crema de Avellana	PP 60 lisa	0.5	P. con Arena
Crema de Cacahuete	PP 60 lisa	0.5	P. con Arena
Cajeta	PP 35 rug.	0.5	P. sin Arena

Analizando los parámetros de Herschel Bulkley, el queso fundido y el betún de chocolate presentaron el mayor esfuerzo de fluencia en comparación con la crema de cacahuete y la crema de avellana. La cajeta presentó un comportamiento no-newtoniano de tipo ley de la potencia.

Cuadro 3.8 Parámetros de los modelos A) Potencia y B) Herschel Bulkley de los semisólidos estudiados.

A)

Producto	Modelo		Potencia		
	K (Pa s ⁿ)	n	r	$\dot{\gamma}_{min} \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{max}$	
Betún de Chocolate	787.99	0.13	0.987	0.0332 - 4.167	
Queso Fundido	804.53	0.34	0.986	0.045 - 2.72	
Crema de Avellana	296.0	0.25	0.996	0.058 - 8.511	
Crema de Cacahuete	857.83	0.19	0.972	0.017 - 0.473	
Cajeta	20.67	0.58	0.999	0.161 - 23.7	

B)

Producto	Modelo		Herschel Bulkley			
	G ₀	K (Pa s ⁿ)	n	r	$\dot{\gamma}_{min} \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{max}$	
Betún de Chocolate	800	229.53	0.28	0.991	0.985 - 19.277	
Queso Fundido	300	575.08	0.31	0.992	0.265 - 2.72	
Crema de Avellana	225	160.206	0.38	0.997	0.760 - 18.15	
Crema de Cacahuete	600	303.574	0.11	0.996	0.271 - 14.82	
Cajeta						

r = Coeficiente de correlación.

Resulta difícil seleccionar el modelo reológico representativo de cada producto excepto en la cajeta. Para los demás productos experimentalmente se

obtuvo un intervalo de velocidad de cizalla (0.0001 - 10) y no presenta un comportamiento típico de un modelo estructurado como el modelo de Carreau

$$\eta = \eta_{\infty} - (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[1 - \left(\kappa \dot{\gamma} \right)^2 \right]^{(n-1)/2} \quad (\text{Steffe, 1995})$$

ni completamente al de un modelo de la potencia. Esto se puede observar más claramente en la Figura 3.3 en las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla donde el esfuerzo de fluencia no es evidente y muestran una disminución inversamente proporcional en el gráfico log-log.

Si se toman los datos de la curva de flujo (esfuerzo de cizalla vs velocidad de cizalla), se obtienen regresiones aceptables que ajustan al modelo Herschel-Bulkley en el límite superior de la velocidad de cizalla obtenido, como se muestra en la Figura 3.4. Esto implica la existencia de un esfuerzo de fluencia. Sin embargo, se tuvieron que eliminar los datos experimentales que corresponden a un esfuerzo anterior al esfuerzo de fluencia obtenido por iteración. En la misma Figura se presenta el ajuste del modelo de la potencia, que incluye más datos experimentales correspondientes al inicio de la prueba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

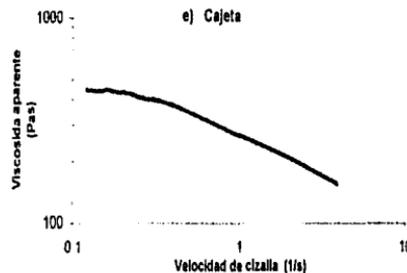
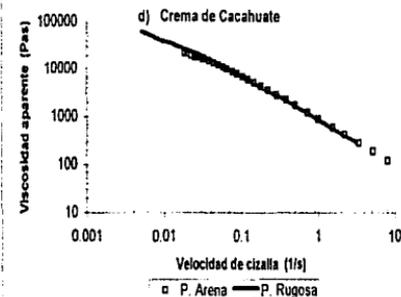
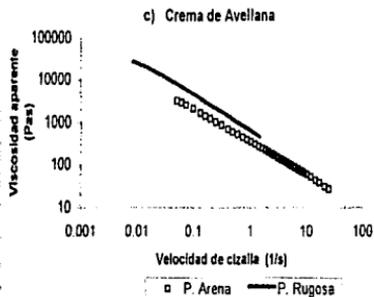
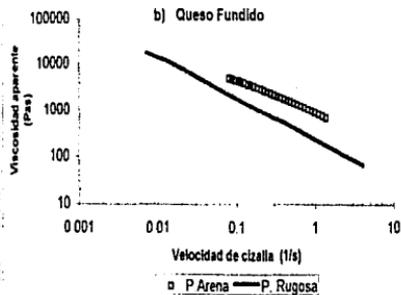
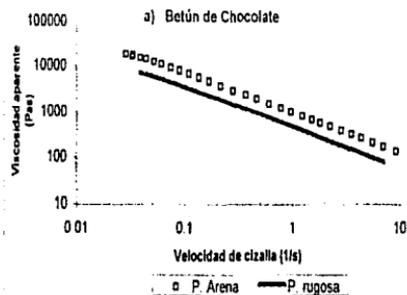


Figura 3.3 Curva promedio de viscosidad aparente de los materiales en estudio con los dos tipos de geometrías utilizadas.

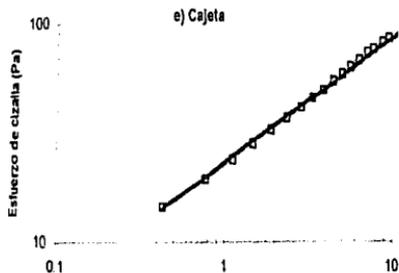
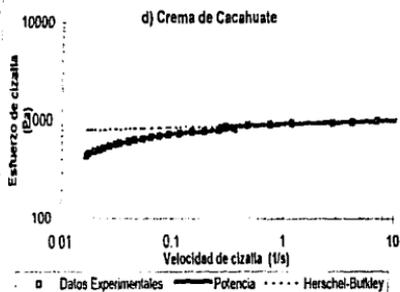
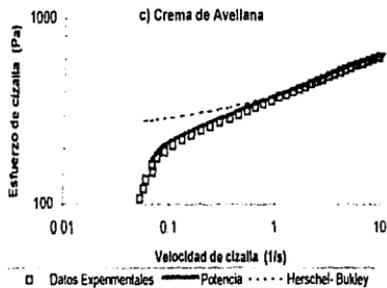
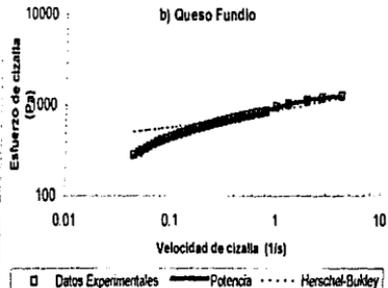
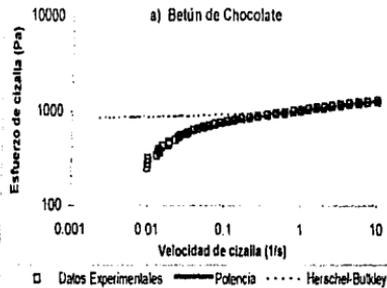


Figura 3.4 Curva promedio de flujo de los materiales en estudio con los dos diferentes modelos matemáticos aplicados

- (□) Datos Experimentales,
- (—) Potencia,
- (- - -) Herschel-Bulkley.

3.2.2 Pruebas de fluencia.

En la Figura 3.5 se muestra el comportamiento obtenido por cada uno de los materiales a un esfuerzo de cizalla constante, los valores obtenidos por esta prueba se presentan a continuación:

Cuadro 3.9 Valores de capacitancia total (J_T) a un esfuerzo de 20 Pa después de 200 segundos para cada uno de los materiales en estudio.

	Betún de Chocolate	Queso Fundido	Crema de Avellana	Crema de Cacahuete	Cajeta
J_T (Pa ⁻¹)	0.9×10^{-2}	6.0×10^{-2}	1.2×10^{-2}	0.7×10^{-2}	470×10^{-2}

J_T Este parámetro representa el 100 % de capacitancia total con respecto al esfuerzo aplicado, que en este caso fue de 20 Pa durante 200 segundos. De los resultados anteriores se puede observar que el betún de chocolate y las cremas de avellana y cacahuete presentaron una capacitancia total cercana entre sí y menor que los demás materiales. La cajeta presentó el mayor porcentaje de capacitancia total en comparación con los demás materiales, reflejando su carácter más fluido.

Cuadro 3.10 Porcentaje de contribución de la capacitancia instantánea (J_0) a la capacitancia total a un esfuerzo de 20 Pa para cada uno de los materiales en estudio.

	Betún de Chocolate	Queso Fundido	Crema de Avellana	Crema de Cacahuete	Cajeta
J_0/J_T (%)	15.4 = 4.08	10.8 = 1.8	12.2 = 6.7	51.5 = 17.9	1.8 = 7.8
C.V. (%)	25.5	14.8	55.9	50.2	7.8

J_0/J_T (%): Representa la contribución de la capacitancia instantánea a la capacitancia total. Este parámetro indica la región en donde el material exhibe un comportamiento puramente elástico. Se puede observar que la crema de cacahuete presentó el mayor porcentaje de capacitancia instantánea, lo que implica que fue el que se deformó más elásticamente. Le siguieron en orden decreciente, con un porcentaje similar el betún de chocolate, la crema de avellana y el queso fundido. Finalmente, la cajeta presentó un muy bajo porcentaje de capacitancia elástica instantánea.

Cabe mencionar que tanto la crema de cacahuete como la crema de avellana presentaron el valor más alto del porcentaje del coeficiente de variación en comparación con los demás productos. El queso fundido presentó un porcentaje de J_0 menor a los productos anteriores pero no muy lejano de los mismos.

Los datos anteriores se pueden comparar con los valores de umbral de fluencia (σ_n) obtenidos en el comportamiento reológico, de los cuales se puede observar que tanto la crema de cacahuete como el betún de chocolate presentaron el valor más alto de (σ_n) lo que es congruente con los valores de porcentaje de contribución de J_0 , ya que estos dos materiales tuvieron la mayor respuesta de capacitancia elástica, quiere decir que requieren de un mayor esfuerzo para que fluyan. Consecutivamente, el queso fundido y la crema de avellana presentaron un valor de (σ_n) y porcentajes de J_0 menores y cercanos entre sí. Por último, la cajeta no presentó (σ_n) y el valor de J_0 fue el más pequeño, lo que indica que su respuesta es menos elástica y que el material es más fluido.

Cuadro 3.11 Porcentaje de contribución de la capacitancia retardada (J_R) a la capacitancia total a un esfuerzo de 20 Pa para cada uno de los materiales en estudio.

	Betún de Chocolate	Queso Fundido	Crema de Avellana	Crema de Cacahuete	Cajeta
J_R/J_T (%)	46.8 = 6.5	61.0 = 3.6	66.5 = 11.7	40.0 = 9.97	51.3 = 2.8
C.V. (%)	12.3	5.2	17.9	21.2	8.0

J_R/J_T (%): Este porcentaje representa la capacitancia de retardo, la cual indica cuando la estructura de un material comienza a cambiar o a destruirse, en este caso bajo un esfuerzo de 20 Pa. De los resultados, se puede decir que la crema de avellana y el queso fundido presentaron un porcentaje de J_R mayor a los demás productos pero muy cercanos entre si. De igual forma el betún de chocolate y la crema de cacahuete reportaron un porcentaje de capacitancia retardada menor a los anteriores pero también muy cercanos. La cajeta por último presentó un porcentaje de J_R menor a los demás materiales.

Cuadro 3.12 Porcentaje de la contribución de la capacitancia viscosa (J_V) a la capacitancia total, a un esfuerzo de 20 Pa para cada uno de los materiales en estudio.

	Betún de Chocolate	Queso Fundido	Crema de Avellana	Crema de Cacahuete	Cajeta
J_V/J_T (%)	37.8 = 10.5	28.1 = 4.8	21.2 = 5.4	28.5 = 9.6	66.8 = 2.9
C.V. (%)	24.4	15.0	26.1	30.0	4.0

J_V/J_T (%): Representa la contribución de la región Newtoniana donde el material fluye y la capacitancia aumenta de forma lineal con respecto al tiempo.

De los resultados se puede observar que la cajeta presentó el mayor porcentaje de capacitancia final con respecto a los demás productos lo que indica que este material responde más al comportamiento de un fluido. No así las el betún de chocolate, las cremas de cacahuete, avellana y el queso fundido los cuales presentaron un menor porcentaje de J_v , es decir que el flujo en estos materiales se inició cuando de habían deformado arriba del 60 % de la capacitancia total ($J_o - J_k$).

La crema de cacahuete, con la menor capacitancia total y el mayor porcentaje de capacitancia instantánea, presentó el segundo porcentaje más bajo de capacitancia retardada. La crema de avellana presentó la mayor contribución de las deformaciones (elásticas instantánea - retardada) debido a la importante contribución de la capacitancia retardada superior a los demás materiales.

Con base en esta prueba los materiales pueden agruparse en cuatro categorías: 1) la crema de cacahuete con un 51.5 % de capacitancia elástica; 2) un grupo con dos materiales: la crema de avellana y el queso fundido con un porcentaje de capacitancia instantánea entre 10 y 12 % y una capacitancia retardada alrededor del 60 %; 3) el betún de chocolate con un 15 % de capacitancia instantánea y 4) la cajeta con sólo 1.8 % de capacitancia instantánea.

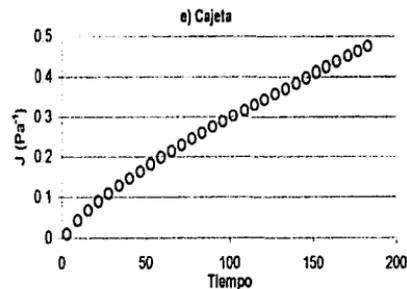
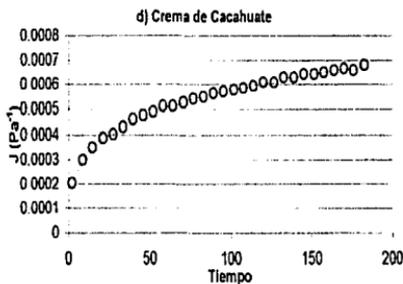
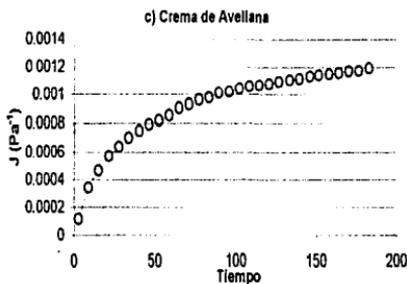
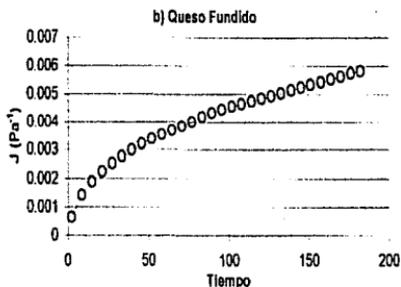
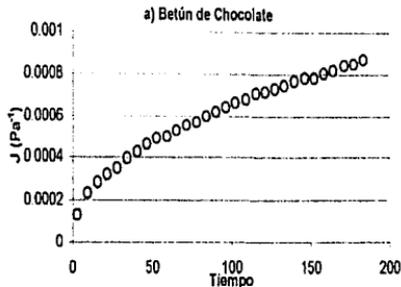


Figura 3.5 Curvas de capacitancia de fluencia de los materiales en estudio a un esfuerzo de 20 Pa.

3.2.3 Pruebas de cizalla oscilatoria

a) Determinación de la zona viscoelástica lineal

En la Figura 3.6 se presentan los gráficos de los barridos de esfuerzo con las dos geometrías utilizadas representativos de cada uno de los materiales en estudio, obtenidos de varias pruebas realizadas. Se observan los gráficos correspondientes a la geometría lisa placa-placa, con un diámetro de 60 mm, y la geometría rugosa placa-placa, con un diámetro de 35 mm, ambas a una frecuencia de 1 Hz y a temperatura ambiente (24 ± 1 °C).

Primeramente se utilizó la geometría rugosa (PP55) con un espacio entre placas de 2.0 mm con el objeto de establecer la zona de viscoelasticidad lineal. Fue muy difícil determinarla en las muestras de crema de cacahuete, bñur de chocolate y crema de avellana, debido a que el esfuerzo mínimo para esta geometría es de 40 Pa y se requería de esfuerzos más pequeños. Posteriormente se aumentó el espacio entre placas de 2.0 mm a 3.0 mm pero los resultados no fueron mejorados. Debido a que no se contaba con una geometría rugosa de mayor diámetro que permitiera ocupar valores de esfuerzos más pequeños, se decidió utilizar la geometría lisa (PP 60) con un espacio entre placas de 2.0 mm y con un esfuerzo menor por aplicar de 7.5 Pa.

Los resultados en la Figura 3.6 que se obtuvieron, basándose en las nuevas condiciones, como se puede observar, permitieron ampliar la respuesta de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') en función del barrido de esfuerzo. De estos gráficos se obtuvo el intervalo de esfuerzo necesario para

obtener la zona de viscoelasticidad lineal y cuantificar los módulos (G') y (G''), así como la viscosidad dinámica (η') en función de la frecuencia para cada uno de los productos. Las condiciones de prueba correspondientes a los gráficos presentados se resumen en el cuadro 3.16.

De los gráficos podemos observar que los productos presentan la misma tendencia con las dos geometrías, pero con la geometría lisa PP 60 se pudo acceder mejor a la zona de viscoelasticidad lineal en dos de las tres muestras problemáticas. Sin embargo, en la crema de cacahuete, aunque mantuvo su carácter elástico (G') por encima del viscoso (G''), con la geometría lisa PP 60 se observó que existía deslizamiento entre las placas aun modificando el espacio entre las mismas de 0.5 mm hasta el máximo de 5.0 mm, por lo que en este producto se decidió utilizar la geometría rugosa PP 35 con el máximo espacio entre las placas (5.0 mm) lo que evitó que la muestra dentro de las placas se saliera, ya que con un espacio entre placas menor, la muestra se salía antes de terminar la prueba. Para la obtención del espectro mecánico se impuso el mínimo esfuerzo permitido por esta geometría (40 Pa).

Cuadro 3.13 Condiciones, dispositivos e intervalos de esfuerzo de la zona lineal obtenidos para cada uno de los materiales en estudio.

Producto	Geometría	Espacio/placas (mm)	f(Hz)	T °C	Esfuerzo (Pa)	Intervalos de zona lineal
Betún de Chocolate	PP 60 lisa	2.0	1.0	23	7.5 - 100	7.5 - 10
	PP 35 rugosa	2.0	1.0	23	38.8 - 100	38.8 - 40
Crema de Cacahuete	PP 60 lisa	3.0	1.0	23	7.5 - 100	7.5 - 10
	PP 35 rugosa	3.0	1.0	23	38.8 - 100	38.8 - 50
Crema de Avellana	PP 60 lisa	3.0	1.0	23	7.5 - 100	7.5 - 10
Queso Fundido	PP 60 lisa	2.0	1.0	23	10 - 200	10 - 100
	PP 35 rugosa	2.0	1.0	23	38.8 - 100	38.8 - 70
Cajeta	PP 60 lisa	2.0	1.0	23	7.5 - 50	7.5 - 10
	PP 35 rugosa	2.0	1.0	23	38.8 - 100	38.8 - 50

En la Figura 3.6 se puede observar que para todos los materiales a excepción de la crema de cacahuete, el intervalo obtenido para la determinación de la zona lineal es más representativo con la geometría lisa de placa-placa (PP 60), que con la geometría rugosa (PP 35) ya que se comprueba menor dependencia de los módulos con el esfuerzo aplicado al principio de los gráficos obtenidos con la geometría lisa. La crema de cacahuete es la única que presentó mejor comportamiento con la placa rugosa, ya que con la placa lisa se observó que existía deslizamiento.

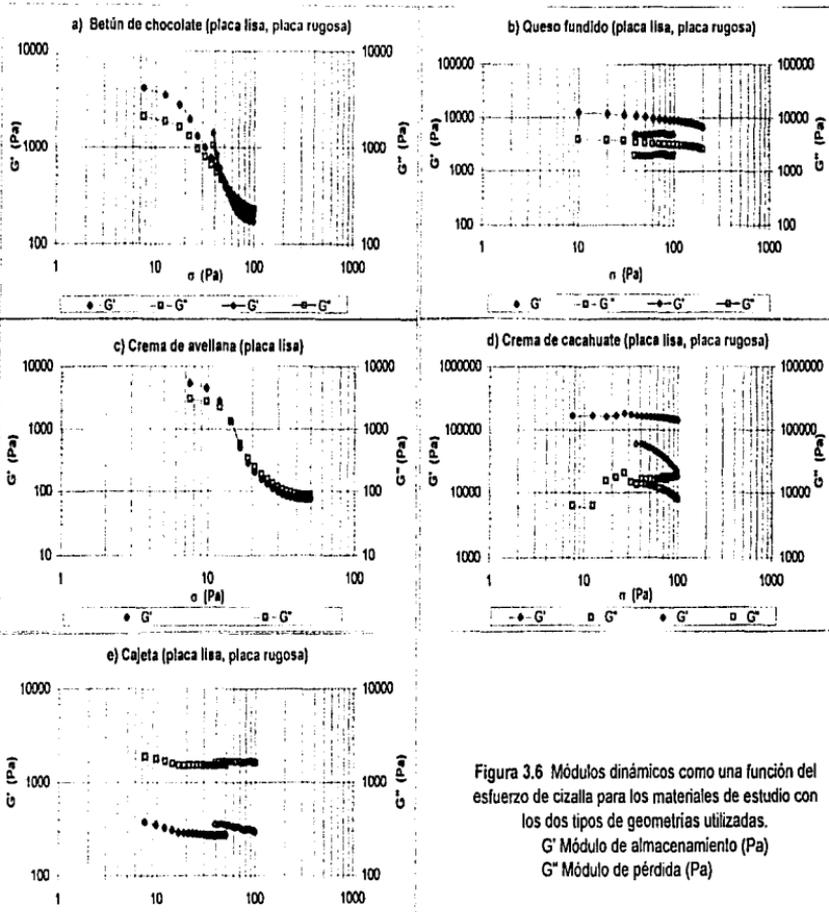


Figura 3.6 Módulos dinámicos como una función del esfuerzo de cizalla para los materiales de estudio con los dos tipos de geometrías utilizadas.
 G' Módulo de almacenamiento (Pa)
 G'' Módulo de pérdida (Pa)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

b) Obtención del espectro mecánico y la viscosidad dinámica correspondiente (η') de los materiales de estudio en función de la frecuencia.

El cuadro 3.14 resume los tipos de geometría utilizados, los esfuerzos a los que se realizó el barrido de frecuencia, el espacio entre placas utilizado para cada uno de los materiales y la temperatura de medición de cada uno de ellos.

Cuadro 3.14 Esfuerzos aplicados a los materiales en estudio en función de la frecuencia.

Producto	Geometría	Espacio/placas (mm)	T °C	σ (Pa)
Berún de Chocolate	PP 60 lisa	3.0	25	10.0
Crema de Cacahuete	PP 35 rugosa	3.0	25	40.0
Crema de Avellana	PP 60 lisa	3.0	25	10.0
Queso Fundido	PP 60 lisa	2.0	25	40.0
Cajeta	PP 60 lisa	2.0	25	40.0

Los gráficos que se presentan en la Figura 3.7 son los más representativos de varias pruebas realizadas a los materiales en estudio. Estos reflejan el comportamiento de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') en función de la frecuencia.

En todos los productos a excepción de la cajeta predominó el módulo elástico sobre el viscoso en todo el intervalo de frecuencia. El berún de chocolate y la crema de avellana presentan un comportamiento intermedio viscoelástico. En estos productos, como se puede observar en los gráficos, la separación que existe entre G' y G'' es menor. En la crema de cacahuete y el queso fundido, la separación entre dichos módulos es mayor.

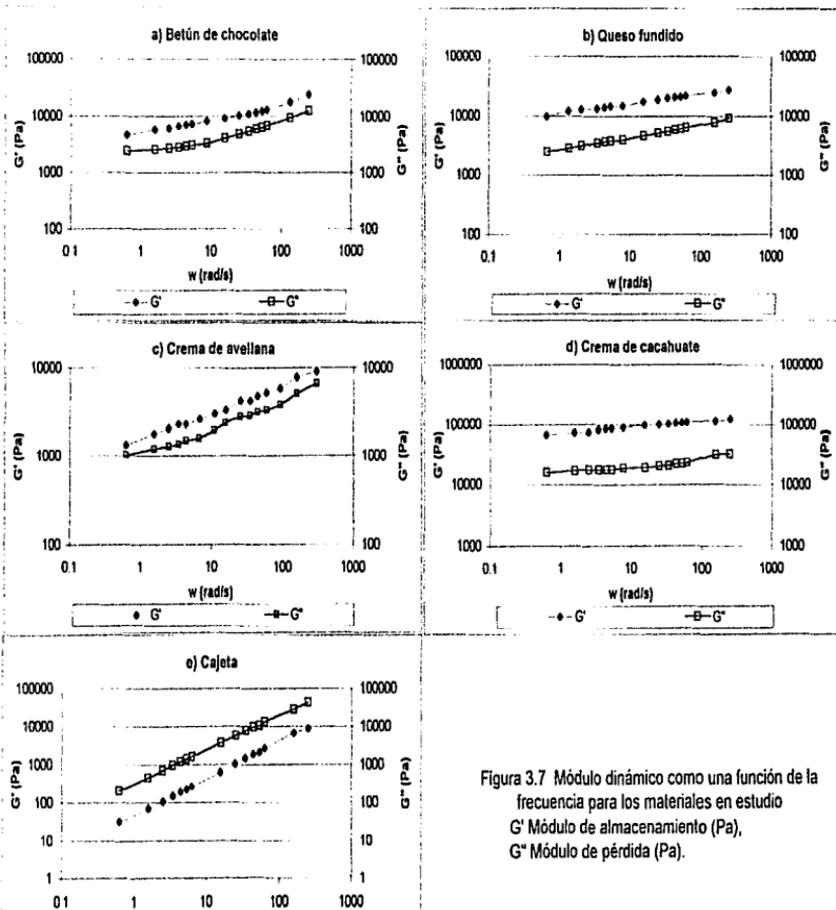


Figura 3.7 Módulo dinámico como una función de la frecuencia para los materiales en estudio
 G' Módulo de almacenamiento (Pa),
 G'' Módulo de pérdida (Pa).

Además se observa una mínima dependencia con la frecuencia en estos últimos y los módulos son más paralelos entre sí.

El cuadro 3.15 presenta los valores obtenidos al ajustar la dependencia de los módulos con la frecuencia a un modelo tipo Potencia con la finalidad de cuantificar el carácter sólido o líquido de los materiales.

Cuadro 3.15 Constantes de la función potencia de G' y G'' en función de la frecuencia de los materiales de estudio.

Producto	Geometría	$G' = a' \omega^{b'}$			$G'' = a'' \omega^{b''}$			tan δ
		a'	b'	r	a''	b''	r	
Berún de Chocolate	PP 60 lisa	4752.3	0.25	0.985	2054.5	0.29	0.969	0.43
Crema de Cacahuete	PP 55 rugosa	2355	0.10	0.990	15079	0.11	0.922	0.21
Crema de Avellana	PP 60 lisa	1501	0.31	0.994	985.6	0.31	0.990	0.65
Queso Fundido	PP 60 lisa	10869	0.10	0.994	2595	0.22	0.994	0.24
Cajeta	PP 60 lisa	45.9	0.96	0.994	305.4	0.90	0.994	6.64

a = Coeficiente. b = Exponente. r = Coeficiente de correlación.

Del cuadro 3.15 y la Figura 3.7 se puede observar que la crema de cacahuete presentó el mayor valor de a' seguido del queso fundido, el berún de chocolate, la crema de avellana y la cajeta. Además G' predominó sobre G'' en todos los productos a excepción de la cajeta, donde G'' fue mayor, lo que indica que tanto en el berún de chocolate, como la crema de avellana, la crema de cacahuete y el queso fundido, el módulo de almacenamiento, predomina sobre el módulo de pérdida en todo el intervalo de frecuencia estudiado; es decir, que predominó más su carácter de sólido que el de líquido.

Para la cajeta se puede observar que igual que en el barrido de esfuerzos, el módulo G'' predomina sobre el módulo G' , es decir su comportamiento es más viscoso y predomina más su carácter líquido que su carácter sólido. La tendencia que presentó fue más lineal y paralela para ambos módulos.

Para describir el comportamiento viscoelástico se utilizó la definición de la tangente delta $\left(\tan \delta = \frac{G''}{G'} = \frac{E''(\omega)''}{E'(\omega)'} = \frac{E''}{E'} \right)$, suponiendo que b' es igual a b'' y que se tiene el mismo intervalo de frecuencia. En el mismo cuadro 3.15 se resumen las relaciones obtenidas.

Se puede confirmar, que conforme a' es mayor, los valores de tangente delta son menores a la unidad correspondiente a los materiales sólidos, como es el caso de la crema de cacahuete, el queso fundido, el betún de chocolate y la crema de avellana. Pero en la cajeta G'' predomina sobre G' por lo que se obtiene un valor de tangente delta mayor que la unidad confirmando su carácter líquido.

Con respecto a la viscosidad dinámica (η'') obtenida en función de la frecuencia en los materiales de estudio, la Figura 3.8 muestra los datos promedio más representativos de varias pruebas realizadas. Se puede observar que los cinco productos parten de viscosidades altas y descienden logarítmicamente en función de la frecuencia presentando también un comportamiento fluidificante a la cizalla oscilatoria. Las constantes de la dependencia de η'' con la frecuencia de tipo Potencia se resumen en el cuadro 3.16.

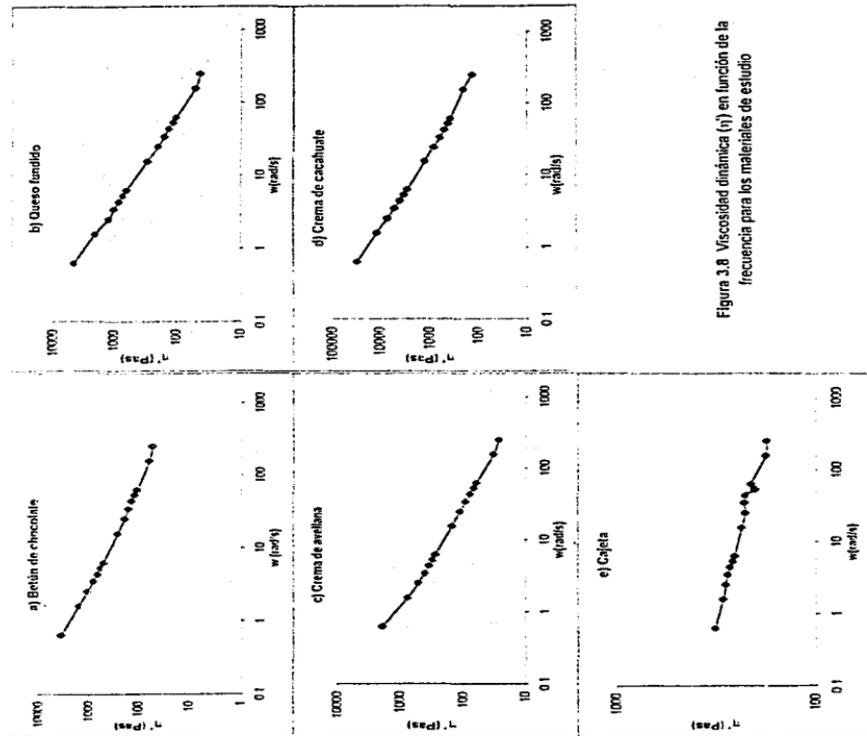


Figura 3.8 Viscosidad dinámica (η') en función de la frecuencia para los materiales de estudio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La crema de cacahuete presentó el mayor valor de viscosidad dinámica en comparación con los demás productos, los cuales mostraron una η' cercana entre sí; a diferencia de la cajeta, la cual presentó el menor valor de la misma.

Este comportamiento se atribuye a que G' predomina sobre G'' en la crema de cacahuete, el queso fundido, el betún de chocolate y la crema de avellana, mientras que en la cajeta G'' predominó sobre G' , lo que muestra una marcada diferencia en los valores de viscosidad dinámica.

Cuadro 3.16 Constantes de la función potencia de η' en función de la frecuencia de los materiales de estudio.

Producto	Geometría	η' (Pa s)		
		a ^{***}	b ^{***}	r
Crema de Cacahuete	PP 35 rugosa	15835	-0.897	0.99
Queso Fundido	PP 60 lisa	2735.9	-0.791	0.99
Betún de Chocolate	PP 60 lisa	2018.9	-0.701	0.99
Crema de Avellana	PP 60 lisa	1016.0	-0.685	0.99
Cajeta	PP 60 lisa	305.4	-0.099	0.98

a = Coeficiente, b = Exponente, r = Coeficiente de correlación.

En el cuadro anterior se puede observar que en orden decreciente la crema de cacahuete presentó el valor más alto del parámetro a^{***}, seguido del queso fundido, el betún de chocolate, la crema de avellana y la cajeta.

En el cuadro 3.17 se muestran los valores del índice de comportamiento obtenido a partir de las constantes de la función potencia de la dependencia de la viscosidad dinámica con la frecuencia de los materiales de estudio (Figura 3.8).

El valor de n obtenido a través del exponente b^{***} se relacionó con los valores del índice de comportamiento (n) obtenidos en las pruebas de cizalla estacionaria (cuadro 3.17).

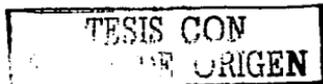
Cuadro 3.17 Índice de comportamiento al flujo (n) de los materiales de estudio obtenida en cizalla estacionaria y en cizalla oscilatoria.

Producto	Cizalla Estacionaria n	Cizalla Oscilatoria $n^* = b^{***} - 1$
Crema de Cacahuete	0.109	0.102
Queso Fundido	0.515	0.208
Berún de Chocolate	0.384	0.299
Crema de Aveliana	0.288	0.517
Cajeta	0.584	0.901

Se puede notar que los índices de comportamiento obtenidos en cizalla oscilatoria son ligeramente inferiores a los obtenidos en cizalla estacionaria, a excepción del índice de la cajeta en el que muestra un índice superior, cercano a la unidad. Este resultado podría atribuirse a fluctuaciones de la muestra en el lote de cajeta.

Por todo lo anterior se pueden agrupar los materiales en tres tipos:

- 1) La crema de cacahuete con un intervalo de módulo de almacenamiento mayor de 10 000 Pa, o una viscosidad dinámica mayor de 10 000 Pa s y una n muy baja (0.1).
- 2) El queso fundido, el betún de chocolate y la crema de avellana se encuentran en un intervalo del módulo de almacenamiento entre 1500 y 10 000 Pa, o una viscosidad dinámica alrededor de 1000 Pa s y una n entre 0.2 y 0.4.
- 3) la cajeta con un intervalo de G' menor a 100 Pa, o una viscosidad dinámica menor de 1000 Pa s y una n superior a 0.6.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se caracterizó el comportamiento reológico y textural de cinco productos semisólidos de tipo untable.

A excepción de la cajeta, la crema de cacahuete, el berún de chocolate, el queso fundido y la crema de avellana presentaron características en las que predominó el comportamiento sólido. Este comportamiento se manifestó como predominio del módulo elástico sobre el módulo viscoso, en las pruebas de cizalla oscilatoria, un comportamiento de tipo Herschel-Bulkley (presencia de un esfuerzo de fluencia) en las pruebas de cizalla estacionaria, una menor pérdida en dureza en las pruebas de cizalla cíclica y una mayor dureza en las pruebas de TPA, así como una menor deformación relativa al aplicar un esfuerzo de 20 Pa en las pruebas de fluencia.

La cajeta presentó características en las que predominó el comportamiento líquido, prevaleciendo el módulo viscoso sobre el módulo elástico en las pruebas de cizalla oscilatoria, un comportamiento de tipo de la Potencia (sin presencia de un esfuerzo de fluencia) en las pruebas de cizalla estacionaria, una mayor pérdida de dureza en las pruebas de cizalla cíclica y una menor dureza en las pruebas de TPA, así como una mayor deformación relativa al aplicar un esfuerzo de 20 Pa en las pruebas de fluencia.

Es importante mencionar que debido a las características propias de los productos comerciales evaluados, a temperatura ambiente, presentaron gran complejidad para la obtención de los parámetros reológicos y texturales reportados

en este trabajo. La complejidad en su composición, el difícil control de la temperatura y las características y condiciones de las pruebas, ocasionaron un comportamiento no homogéneo en los resultados experimentales obtenidos, por lo que en algunos casos fue necesario hacer hasta más de cinco repeticiones por experimento con el objeto de obtener un análisis estadístico con un coeficiente de variación lo menor posible.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda en los productos semisólidos untables con mayor contenido de lípidos, realizar pruebas de perfil de textura únicamente durante el primer ciclo de compresión, ya que este permite cuantificar los dos parámetros que tuvieron mayor relevancia, en este tipo de productos como son la dureza y la fuerza adhesiva. Sin embargo, es recomendable también la determinación de la adhesividad por un método más específico, que permita tener menor variación en la respuesta. En cuanto a las pruebas de fatiga cíclica, estas se recomiendan para cuantificar el daño mecánico que puede sufrir este tipo de materiales.

En cuanto a las pruebas reológicas, se recomienda realizar pruebas de cizalla oscilatoria para determinar el predominio del carácter sólido o del carácter fluido del material, sin olvidar utilizar las geometrías rugosas y colocar un exceso de muestra, tratando de no dañar la estructura por la manipulación.

Definitivamente, las pruebas de flujo y las de fluencia no se recomiendan de manera rutinaria, ya que por ser materiales complejos es difícil encontrar las mismas condiciones iniciales y al cizallarlas a velocidades intermedias ($>10 \text{ s}^{-1}$) se

obtiene una respuesta variable como consecuencia de las propiedades viscoelásticas y el deslizamiento es muy evidente a pesar de utilizar geometrías rugosas.

Después de realizar este estudio se sugiere que para pruebas de perfil de textura, fatiga cíclica y de compresión a esfuerzo o deformación constante, evaluar la respuesta del material directamente en el envase original que los contiene, para así evitar el efecto que la manipulación tiene en los resultados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

- Anadha, M. 1999. "Rheology of fluid and semisolid food principles and application". Connecticut. E.U.A.
- Badui, D. S. 1994. "Química de los alimentos". Alhambra. México, 505-519.
- Balmori, C. L. y Vazquez, G. O. 1998. Elaboración de un manual práctico de probabilidad y estadística para la carrera de ingeniería en alimentos "Revisión Bibliográfica". Tesis FESC-UNAM
- Barbosa, G. V., Ibarz, A. y Peleg, M. 1993. Propiedades reológicas de alimentos fluidos. Revista alimentaria. 4 (3): 39-59.
- Barbosa, G. V. y Ma. L. 1989. Review: Instrumentation for the rheological characterization of foods. Food science and technology international, 11: 3-17.
- Barbosa, G. V. 1996. The rheology of semiliquid foods adv. in food nutrition Res. 39: 3-21.
- Beckett, T.S. 1994. "Fabricación y utilización industrial del chocolate". Acirbia, España, 159-176.
- Bourne, C. M. 1978. Texture profile analysis. Food Technol. 7 (6): 62-67.

- Bourne, C. M. y Comstock, H. S. 1981. Effect of degree of compression on texture profile parameters. *J. Texture Stud.* 12, 201-216.
- Bourne, C. M. 1982. "Food texture and viscosity. Concept and measurement". Academic press, Londres. 9-19, 209-245.
- Brunn, P., Muller, M. y Bschorer, S. 1996. Slip of complex fluids in viscometry. *Rheol. acta* 35 (3): 242-251.
- Campanella, O. H. y Peleg, M. 1987. Squeezing flow viscosimetry of peanut butter. *J. Food Sci.* 52 (1): 180-184.
- Citerne, P.G, Carreau, J.P. y Moan, M. 2001. Rheological properties of peanut butter. *Rheol. Acta* 40: 86-96.
- Cooper, R. H. 1982. "Food texture instrumental and sensory measurement". Nueva Zelanda Dairy Res. Inst. Palmerston North.
- Cornec, M. y Wilde, P. J., Mackie, A. R., Husband, F. A., Parker, M. L. y Clark, D. C. 1998. Emulsion stability as affected by competitive adsorption between an oil-soluble emulsifier and milk proteins at the interface. *J. Food Sci.* 63 (1): 39-43.
- Darby, R. y Lissant, K. J. 1986. Emulsions and emulsion technology Part III Marcel Dekker Inc. 110-178.

De Man M. J. 1980. "Principles of food chemistry". The Avi Publishing Company Westport Connecticut. 275-280.

Dervisoglu, M. y Kokini, J.L. 1986. Steady shear rheology and fluid mechanics of four semisolid foods. J. Food Sci. 51 (3): 541-625.

Ercan, S.N y Dervisoglu, M. 1997. Studies of the steady flow behavior of hazelnut paste. J. of Food Process Eng. 21 (8): 181-190.

Fennema, R. O. 1985. "Introducción a la ciencia de los alimentos". Reverté, España. 630-646.

Ferrero C., Navarro, A. S. Y Zaritzky, N. E. 1999. Rheological characterization of "Dulce de leche " by dynamic and steady shear measurements. J. Texture Stud. 30 : 43-58.

Fisman S. M., Costell, F., Duran, L. 1983 Medida del comportamiento reológico de los alimentos sólidos. I. Bases teóricas. Rev. Agroquímica y Tecnol. Alimentos. 23 (2): 164-172.

Fizman S. M. 2000 Stability of single-compression and TPA test to determine adhesiveness in solid and semisolid foods. J.Texture Stud. 31 (1): 55-68.

Geankoplis, J. C. 1995. "Procesos de transporte y operaciones unitarias". Compañía Editorial Continental. 2ª Edición, México D.F., 132-137.



Giles, R. V. 1985. Mecánica de los fluidos e hidráulica. Mc Graw- Hill, España, 273-280.

Gills, A.L. y Resurrección, A. V. A. 2000. Sensory and physical properties of peanut butter treated with palm oil and hydrogenated vegetable oil to prevent oil separation. J. Food Sci. 65 (1): 173-180.

Gunasckara, S. 2001. Nondestructive food evaluation. Board. New York, 287-293.

Haake 1994. A General Introduction to the Theory of Forced-Oscillation V93-47E.

Haake 1994. A general introduction to the theory of creep testing. V92-47 E.

Harris, J. 1980 A continuum theory of structural change. Rheol. Acta 11: 145-151.

Hasenhuettl, G. L. Hartel, R. W. 1997. "Food emulsifiers and their applications". International Thompson Publishing, USA.

Holland, B. 1992. "Fruits and nuts. The composition of Foods". 5th Edition, Royal Society of Chemistry U.K. 88-100.

Kenneth, J. L. 1986 "Emulsions and emulsion technology" Part III Marcel Dekker Inc. 46-105.

Kokini, J. L. y Dickie, A. 1981. An attempt to identify and model transient viscoelastic flow in foods. *J. Texture Stud.* 12: 539-557.

Kokini, J. L. y Dickie, A. 1982. A model of food spreadability from fluid mechanics. *J. Texture Stud.* 13: 211-227.

Kokini, J. L. 1985. Fluid and semi-solid food texture and texture-taste interactions. *Food Technol.* (11): 86-94.

Lau, H. M., Tang, J. y Paulson, A. T. 2000. Texture profile and turbidity of gellan/gelatin mixed gels. *Food Res. Int.* 33: 665-671.

Lima, M. I., Guraya, H. S. y Champagne, E. T. 2000. Improved peanut flour for a reduced-fat peanut butter product. *J. of Food Sci.* 65 (5): 854-861.

Loisel, C., Lecq, G., Keller, G. Y Ollivon, M. 1998. Dynamic crystallization of dark chocolate as affected by temperature and lipid additives. *J. Food Sci.* 65 (1): 73-79.

Muego, K. F., Resurrección A. V. A. y Hung Y. C. 1990. Characterization of textural properties of spreadable peanut based products. *J. Texture Stud.* 21: 61-73.

Muller, G. H. 1978. "Introducción a la reología de los alimentos". Acribia. España 74-125.

Navarro, A. G. y Ramírez, L. E. 1998. Métodos de muestreo. Revista alimentaria. 6 (3): 27-34.

Pauletti, S. M., Castelao, E., Sabbay, N. y Costa, S. 1999. Velocidad de las reacciones responsables del color de dulce de leche. J. Food Sci. Technol. Int. 1: 137-140.

Peleg, M. 1985. Comparison between various correction factors in the calculation of the creep compliance. J. Texture Stud. 16: 119-127.

Peressini, D., Sensidoni, A. y Cindio, B. 1998. Rheological characterization of traditional and light mayonnaises. J. Food Eng. 35: 409-417.

Pons y Fiszman, S. M. 1996. Instrumental texture profile analysis with particular reference to gelled systems. J. Texture Stud. 27: 597-624.

Ramírez, G. A. 1983. "Aproximación a la reología". Bucaramanga Colombia 7, (2): 77-86.

Sanchez, T. M. 1996. Food texture: Concept and measurement. Revista alimentaria. 3(5): 30-35.

Schramm, G. 1994. "A practical approach to rheology and rheometry". Academic. New York, USA.



- Sherman P. 1970. "The relationship of shear and stress to textural properties of food". 3rd Int. Cong. Food Sci. Technol. U.S.A. 421-434.
- Singh, S. K., Castell-Pérez, M. E. y Moreira R. G. 2000. Viscosity and textural attributes of reduced-fat peanut pastes. J. Food Sci. 65 (5): 849-853.
- Stauffer, C. E. 1998. "Emulsifiers". Egan Press, USA. 68-75.
- Steffe, F. J. 1995. "Rheological methods in food process engineering". Michigan Press, USA. 2-184.
- Suwonsichon, T. y Peleg, M. 1999. Imperfect squeezing flow viscosimetry of mustards with suspended particulates. J. of Food Eng. 39: 217-226.
- Vernon C. B. J., Torreblanca, R. A. y Lever, G. C. A. 1982. Propiedades reológicas de emulsiones alimenticias. Tec. Aliment 18 (1): 3-10.
- Vernon C. B. J. 1995. Estudio de las Propiedades Viscoelásticas de Productos Alimenticios. Revista Tec. Aliment. 18 (2): 10-17.
- Walpole, R. E. 1992. "Probability and statistics for engineers and scientists". McGraw-Hill. Mc Millan Publishing Company U.S.A.
- Xu, W., Nikolou, A., Wasan, D. T., Gonsalves, A. y Borwankar, R. P. 1998. Fat particle structure and stability of food emulsions. J. Food Sci. 63 (2): 183-188.