



U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN



Departamento de
Exámenes Profesionales

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**"DESARROLLO DE PROGRAMAS COMPUTACIONALES PARA EL CÁLCULO DE
DUREZA EN UN PENETROMETRO UNIVERSAL Y PARAMETROS DE CREEP CON
EL MODELO DE BURGER"**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS
P R E S E N T A :
ALEJANDRO OTHONIEL GÓMEZ CHÁVEZ

ASESOR: IBQ. NORMA B. CASAS ALENCASER

CUAUTITLÁN IZCALLI EDO. DE MEX.

NOVIEMBRE, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



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

U. N. A. M.
UNIDAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

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:

Desarrollo de Programas Computacionales para el Cálculo
Dureza en un Penetrómetro Universal y Parámetros de Creep
con el Modelo de Burger.

que presenta al pasante: Alejandro Othoniel Gómez Chávez
con número de cuenta: 9156197-2 para obtener el TITULO de:
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 12 de Septiembre de 2001

PRESIDENTE	<u>M. en C. Rosa M. Arriaga Orihuela</u>	<i>Arriaga</i>
VOCAL	<u>I.B.Q. Norma B. Casas Alencaster</u>	<i>Norma B. Casas</i>
SECRETARIO	<u>L.L. Rosalva Meléndez Pérez</u>	<i>Rosalva</i>
PRIMER SUPLENTE	<u>L.L. Ma. del Carmen Valderrama Bravo</u>	<i>Ma. del Carmen</i>
SEGUNDO SUPLENTE	<u>L.L. Ana Ma. Carrero Bautista</u>	<i>Ana Ma. Carrero</i>

A mis Padres Zulema y José Luis.

a mis Hermanos Flor y Zeluis,

A mi ahijada Inara y a mi sobrino Eliot.

**A todas esas personas que han estado junto a mi a lo
largo de mi camino,**

A todas esas personas que significan algo en mi vida,

A la Profra. Norma Casas por su paciencia y apoyo

**Y a Dios por permitirme llegar a este momento y por estar siempre
mi lado,**

DEDICO ESTE TRABAJO CON TODO MI CORAZÓN

ÍNDICE

	Página
Resumen	
Introducción	
Objetivos	
Capítulo I	
Generalidades	1
1.1. Importancia y aplicación de pruebas de textura y reológicas en materiales alimenticios	1
1.2. Propiedades Mecánicas de materiales	2
1.3. Definición de Textura	2
1.4. Tipos de pruebas para la evaluación de las propiedades mecánicas de los alimentos	5
1.4.1 Pruebas Fundamentales	6
1.4.2. Pruebas Empíricas	7
1.4.3. Pruebas Imitativas	8
1.5 Pruebas de penetración	9
1.5.1. Penetrómetro Universal	10
Descripción del Penetrómetro Universal	10
1.5.2. Operación del Penetrómetro Universal	13
1.5.3. Desarrollo de las fórmulas para el cálculo de Dureza con Penetrómetro Universal	14
1.5.4. Cálculo de la dureza usando un cono como dispositivo de penetración	14
1.5.5. Cálculo de la dureza usando una aguja como dispositivo de penetración	16
1.6. Pruebas reológicas fundamentales para comportamiento viscoelástico	17
1.6.1. Materiales Ideales	17
1.6.2. Viscoelasticidad	18
1.6.3. Modelo de Maxwell	20
1.6.4. Sólido Viscoelástico (Modelo Kelvin-Voigt)	21
1.6.5. Pruebas Estáticas	22
1.7. Pruebas de Relajación	22
1.8. Pruebas de Fluencia (Creep Compliance)	24
1.8.1. Comportamiento de los materiales viscosos, elásticos y viscoelásticos en pruebas de Creep	24
1.8.2. Modelo de Burger	25
1.9. Métodos de análisis de los datos obtenidos de una prueba de Creep	28
1.9.1. Método I: Cálculo de los parámetros del modelo de Burger usando el método gráfico de Inokuchi	29
1.9.2. Método II: Cálculo del porcentaje de contribución de cada uno de los componentes de la curva de Creep a la deformación total.	33
1.10 Método III: Cálculo de los parámetros de Creep mediante el uso del modelo simplificado de Burger (Función Creep)	35
1.11. Requerimientos para la prueba estática de Fluencia	38
1.12. Algunas aplicaciones de las pruebas de Fluencia en alimentos	39
1.13. Instrumentos para efectuar pruebas de Fluencia	39

Capítulo II	Desarrollo de los programas de cómputo	41
	2.1. Importancia del uso de la computadora en la Ingeniería y Tecnología de Alimentos	41
	2.2. Metodología para el desarrollo de programas computacionales	43
	1. Planteamiento del problema	43
	2. Desarrollo del algoritmo	44
	3. Elaboración del diagrama de flujo	54
	4. Selección del lenguaje de programación	61
	5. Codificación	62
	6. Compilación	62
	7. Depuración del programa	62
	8. Prueba	62
	9. Implementación	63
Capítulo III	Prueba de los programas	64
	A) Prueba del programa "TEXTURA"	64
	Caso I: Solamente penetra parte del cono de 15°	64
	Caso II: Penetra todo el cono de 15° y parte del cono de 45°	65
	Caso III: Penetra parte del cono de la aguja	66
	Caso IV: Penetra todo el cono de la aguja y parte de la varilla	67
	Comentarios de los resultados obtenidos en los cuatro casos	67
	B) Prueba del programa "CREEP" en sus diferentes opciones	
	- Cálculo de los parámetros del modelo de Burger	
	- Cálculo de los parámetros del modelo de Burger generalizado	
	- Porcentaje de contribución de los parámetros de Burger a la deformación total.	69
	Comparación del tiempo que se invierte en cada uno de los programas para obtener los resultados	95
	Resumen de la prueba del programa CREEP	96
	Conclusiones	99
Anexo I	Nomenclatura usada en fórmulas	101
Anexo II	Simbología de Diagramas de flujo	103
	Bibliografía	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1.1	Tipos de pruebas para medir textura en alimentos	6
Tabla No. 1.2	Dimensiones de los dispositivos del Penetrómetro Universal	12
Tabla No. 3.1a	Condiciones de experimentación, Caso I	64
Tabla No. 3.2a	Cálculo de dureza usando un Penetrómetro Universal, Caso I, Resultados obtenidos con el programa TEXTURA y con Excel	65
Tabla No. 3.3a	Condiciones de experimentación, Caso II	65
Tabla No. 3.4a	Cálculo de dureza usando un Penetrómetro Universal, Caso II, Resultados obtenidos con el programa TEXTURA y con Excel	66
Tabla No. 3.5a	Condiciones de Experimentación, Caso III	66
Tabla No. 3.6a	Cálculo de dureza usando un Penetrómetro Universal, Caso III, Resultados obtenidos con el programa TEXTURA y con Excel	66
Tabla No. 3.7a	Condiciones de Experimentación, Caso IV	67
Tabla No. 3.8a	Cálculo de dureza usando un Penetrómetro Universal, Caso IV, Resultados obtenidos con el programa TEXTURA y con Excel	67
Tabla No. 3.1b	Parámetros reológicos reportados para queso Cheddar	69
Tabla No. 3.2b	Muestra de queso Cheddar, Comparación de los parámetros de Creep (1EK) obtenidos con los diferentes programas	70
Tabla No. 3.3b	Muestra de queso Cheddar, Comparación de los parámetros de Creep (2EK) obtenidos con los diferentes programas	71
Tabla No. 3.4b	Muestra de queso Cheddar, Comparación de los parámetros de la Función Creep obtenidos con los diferentes programas	72
Tabla No. 3.5b	Muestra Queso Cheddar, comparación entre programas.	73
Tabla No. 3.6b	Muestra de queso Cheddar, Contribución de cada elemento a la deformación total	74
Tabla No. 3.7b	Parámetros reológicos reportados para queso Cheddar	75
Tabla No. 3.8b	Muestra de queso Cheddar, Comparación de los parámetros de Creep (1EK) obtenidos con los diferentes programas	75
Tabla No. 3.9b	Muestra de queso Cheddar, Comparación de los parámetros de Creep (2EK) obtenidos con los diferentes programas	77
Tabla No. 3.10b	Muestra de queso Cheddar, Comparación de los parámetros de la Función Creep obtenidos con los diferentes programas	78
Tabla No. 3.11b	Muestra Queso Cheddar, comparación entre programas.	79
Tabla No. 3.12b	Muestra de queso Cheddar, Contribución de cada elemento a la deformación total	79
Tabla No. 3.13b	Parámetros reológicos reportados para papa fresca	80
Tabla No. 3.14b	Muestra de papa fresca, Comparación de los parámetros de Creep (1EK) obtenidos con los diferentes programas	81
Tabla No. 3.15b	Muestra de papa fresca, Comparación de los parámetros de Creep (2EK) obtenidos con los diferentes programas	82
Tabla No. 3.16b	Muestra de papa fresca, Comparación de los parámetros de la Función Creep obtenidos con los diferentes programas	83
Tabla No. 3.17b	Muestra de papa fresca, comparación entre programas.	83
Tabla No. 3.18b	Muestra de papa fresca, Contribución de cada elemento a la deformación total	84
Tabla No. 3.19b	Parámetros reológicos reportados para geles de Xantana adicionados con 1.0% de iones fierro	85
Tabla No. 3.20b	Muestra de geles de Xantana adicionados con 1.0% de iones fierro, Comparación de los parámetros de Creep (1EK) obtenidos con los diferentes programas	85
Tabla No. 3.21b	Muestra de geles de Xantana adicionados con 1.0% de iones fierro,	

	Comparación de los parámetros de Creep (2EK) obtenidos con los diferentes programas	86
Tabla No. 3.22b	Muestra de geles de Santana adicionados con 1.0% de iones fierro, Comparación de los parámetros de la Función Creep obtenidos con los diferentes programas	87
Tabla No. 3.23b	Muestra de geles de Santana adicionados con 1.0% de iones fierro, comparación entre programas.	87
Tabla No. 3.24b	Muestra de geles de Xantana adicionados con 1.0% de iones fierro, Contribución de cada elemento a la deformación total	89
Tabla No. 3.25b	Muestra de mousse, Comparación de los parámetros de Creep (1EK) obtenidos con los diferentes programas	90
Tabla No. 3.26b	Muestra de mousse, Comparación de los parámetros de Creep (2EK) obtenidos con los diferentes programas	91
Tabla No. 3.27b	Muestra de mousse, Comparación de los parámetros de la Función Creep obtenidos con los diferentes programas	92
Tabla No. 3.28b	Muestra de mousse, comparación entre programas.	94
Tabla No. 3.29b	Muestra de mousse, Contribución de cada elemento a la deformación total	94
Tabla No. 3.30b	Comparación del tiempo empleado en cada programa para ingresar los datos y obtener los resultados	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1.1	Penetrómetro Universal	11
Figura No. 1.2	Representación esquemática de los dispositivos de penetración, Penetrómetro Universal	13
Figura No. 1.3	Cuerpo elástico retardado	18
Figura No. 1.4	Modelos mecánicos Ideales	20
Figura No. 1.5	Modelo de Maxwell	20
Figura no. 1.6	Curvas de Creep y Relajación para el modelo de Maxwell	21
Figura No. 1.7	Modelo Mecánico de Kelvin-Voigt	21
Figura No. 1.8	Modelo Mecánico de Burger	22
Figura No. 1.10	Pruebas de relajación	23
Figura No. 1.11	Curva de relajación para materiales viscoelásticos	23
Figura No. 1.12	Experimentos de Fluencia (Creep)	25
Figura No. 1.13	Modelo mecánico de Burger	26
Figura No. 1.14	Curva de deformación de Creep	27
Figura No. 1.15	Representación gráfica de Q	31
Figura No. 1.16	Ln Q Vs tiempo	31
Figura No. 1.17	Ln Q - Q' Vs tiempo	32
Figura No. 1.18	Componentes de la deformación en la curva de Creep y el modelo de Burger	33
Figura No. 1.19	Representación Gráfica de la Función Creep	35
Figura No. 1.20	Gráfica linealizada de la Función Creep	35
Figura No. 2.1	Diagrama de Flujo del programa "TEXTURA"	37
Figura No. 2.2	Diagrama de Flujo del programa "CREEP"	55
Figura No. 3.1	Muestra de queso Cheddar 1, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (1EK)	57
Figura No. 3.2	Muestra de queso Cheddar 1, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (2EK)	70
Figura No. 3.3	Muestra de queso Cheddar 1, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (FUNCIÓN CREEP)	72
Figura No. 3.4	Muestra de queso Cheddar 2, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (1EK)	73
Figura No. 3.5	Muestra de queso Cheddar 2, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (2EK)	76
Figura No. 3.6	Muestra de queso Cheddar 2, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (FUNCIÓN CREEP)	77
Figura No. 3.7	Muestra de papa fresca, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (1EK)	78
Figura No. 3.8	Muestra de papa fresca, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (2EK)	81
Figura No. 3.9	Muestra de papa fresca, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (FUNCIÓN CREEP)	82
Figura No. 3.10	Muestra de gel de Xantana adicionada con iones fierro al 1.0%, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (1EK)	83
Figura No. 3.11	Muestra de gel de Xantana adicionada con iones fierro al 1.0%, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (2EK)	86
Figura No. 3.12	Muestra de gel de Xantana adicionada con iones fierro al 1.0%, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (FUNCIÓN CREEP)	87
Figura No. 3.13	Muestra de mousse, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (1EK)	88
Figura No. 3.14	Muestra de mousse, grafica comparativa de j experimental Vs J	

	calculada (2EK)	90
Figura No. 3.15	Muestra de mou93sse, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (FUNCIÓN CREEP)	93
Figura No. 3.16	Muestra de mousse, grafica comparativa de j experimental Vs J calculada (Función Creep) programa CURVE EXPERT	93

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es desarrollar dos programas de cómputo, para facilitar el cálculo en pruebas de penetración y de Creep, el primero de ellos realiza el cálculo para el análisis de datos en pruebas de penetración para determinar la dureza de un material, y el segundo realiza el análisis de datos en pruebas de Creep en materiales viscoelásticos para determinar los parámetros del modelo de Burger. Para lograrlo la tesis se ha estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo II "**Desarrollo de los programas de Computo**" se hace una breve introducción acerca de la importancia que tiene el uso de la computadora en la Ingeniería y la Tecnología de Alimentos, posteriormente se describe la metodología que debe seguirse para el desarrollo de un programa de cómputo. Finalmente se procede al desarrollo de cada uno de los programas, el primero de ellos diseñado para el análisis de datos de pruebas de penetración se le asigna el nombre "**TEXTURA**" y al segundo diseñado para realizar el análisis de resultados en pruebas de Creep" a este programa se le asigna el nombre de "**CREEP**".

Para el desarrollo de los programas se utilizó Turbo Pascal para su compilación, una vez desarrollados estos, se procedió a realizar la prueba de ambos programas. Para el cálculo de dureza (Programa TEXTURA) se utilizaron datos teóricos de distancia de penetración y la dureza correspondiente se calculó con el programa y con una hoja de cálculo diseñada en Excel. Para la prueba del programa CREEP el cual realiza el cálculo de los parámetros del modelo de Burger con 1 y 2 tiempos de retardo y del modelo de Burger simplificado (función Creep), se generaron valores de $J(t)$. En este caso se utilizaron datos bibliográficos de pruebas de Creep realizadas a queso Cheddar, papa fresca y geles de goma Xantana adicionados con iones de hierro, así mismo se utilizaron datos obtenidos en el laboratorio para un mousse de chocolate en una prueba de Creep por compresión. En todos los casos, los datos fueron ingresados a una hoja de cálculo en Excel diseñada basándose en el método gráfico de Inokuchi, y al programa CREEP y al software matemático comercial CURVE EXPERT al que previamente se le ingresaron los modelos.

INTRODUCCIÓN

Una de las pruebas empíricas más ampliamente usadas en la industria de alimentos, especialmente en las áreas de control de calidad y en el desarrollo de nuevos productos es la prueba de penetración. El objetivo de realizar este tipo de pruebas consiste en obtener el valor de la dureza del material que se está evaluando definida como el cociente de la fuerza que opone un material a la penetración de un cuerpo, entre el área del cuerpo que penetró.

El cálculo de este parámetro es sencillo, sin embargo requiere que se realicen una gran cantidad de cálculos aritméticos y se use una serie de fórmulas trigonométricas, en función de la forma geométrica del cuerpo que penetra.

Este tipo de pruebas proporciona información muy importante acerca de las características sensoriales del alimento, información que en la mayoría de los casos requiere ser conocida de manera rápida.

Por otro lado, en pruebas reológicas aplicadas a ciertos materiales alimenticios para la evaluación del comportamiento viscoelástico, los datos experimentales de deformación relativa al esfuerzo ("compliance") vs. tiempo obtenidos en una prueba de fluencia (Creep) pueden ser descritos por diferentes modelos reológicos. Una buena descripción para materiales alimenticios sólidos ha sido obtenida por el modelo lineal viscoelástico generalizado Kelvin-Voigt.

$$J(t) = K_0 + K_1 t + \sum_{i=2}^N K_i (1 - e^{-t/T_i})$$

donde $J(t)$ es el compliance, las K 's son constantes y las T 's son los tiempos de retardo. Un modelo mecánico es asociado para esta ecuación el cual consiste en un elemento elástico (K_0) unido en serie con un elemento viscoso (K_1) y uno o más elementos Kelvin (Un elemento viscoso y uno elástico asociados en paralelo) Describir una curva de fluencia individual generalmente requiere entre 4 y 12 constantes. El tercer elemento de la ecuación puede ser descrito por una ecuación de dos constantes de la forma:

$${}^t \varphi(t) = K_2 + K_3 t$$

Llamada función Creep, de la misma manera, una curva de fluencia puede ser descrita de una manera simplificada por:

$$J(t) = K_0 + K_1 t + \frac{t}{K_2 + K_3 t}$$

Pruebas de fluencia pueden ser desarrolladas por compresión o cizallamiento en máquinas universales de deformación o reómetros, respectivamente. Para ajustar los datos obtenidos a los modelos antes mencionados y obtener el valor de las constantes involucradas en los modelos se puede hacer uso de los siguientes métodos:

- Mediante un programa matemático comercial.
- Por medio del análisis incluido en el equipo donde los datos experimentales fueron obtenidos. Siempre y cuando el modelo generalizado Kelvin-Voigt este disponible.
- El método Gráfico de Inokuchi en una hoja de cálculo como MS Excel.
- Un programa computacional especialmente diseñado, basado en el método gráfico de Inokuchi.

Barbosa-Canovas y Ma. (1997) así como Purkayastha et. Al. (1985), entre otros autores, reportaron constantes del modelo generalizado Kelvin-Voigt para geles de xantana, queso Cheddar y papa respectivamente, obtenidos con paquetes matemáticos comerciales. En algunos de estos casos aunque el ajuste fue bueno, los programas obtuvieron valores de las constantes sin un significado físico lógico, (valores negativos para K_1 y valores demasiado altos o negativos del tiempo de retardo).

Por lo antes mencionado, este trabajo plantea el desarrollo de dos programas computacionales. Uno para efectuar los cálculos de dureza en pruebas desarrolladas en el Penetrómetro Universal y otro para ajustar los datos experimentales en pruebas de fluencia efectuadas en reómetros o texturómetros, al modelo de Kelvin-Voigt generalizado y al modelo simplificado, basado en el método gráfico de Inokuchi y obtener las constantes correspondientes. Estos programas permitirán obtener de manera rápida los resultados que por otros métodos pueden tomar un tiempo considerable y pueden ser muy útiles a nivel industrial o de investigación.

OBJETIVOS:

GENERAL:

Desarrollar y probar programas computacionales que faciliten el cálculo de parámetros en pruebas reológicas y de textura específicas.

PARTICULARES:

- 1.- Desarrollar un programa computacional usando el lenguaje de programación TURBO PASCAL para disminuir el tiempo y facilitar el cálculo de Dureza con datos de distancia de penetración obtenidos con un Penetrómetro Universal.
- 2.- Desarrollar un programa computacional usando el lenguaje de programación TURBO PASCAL para disminuir el tiempo y facilitar el cálculo de los parámetros del modelo de Burger con 1 y 2 tiempos de retardo y el modelo de Burger simplificado a partir de datos de pruebas de Creep.
- 3.- Probar los programas desarrollados comparando los resultados del programa con los obtenidos con una hoja de cálculo y un programa matemático comercial para demostrar las ventajas del uso de los programas elaborados.

CAPITULO I GENERALIDADES

1.1. IMPORTANCIA Y APLICACIÓN DE PRUEBAS DE TEXTURA Y REOLÓGICAS EN MATERIALES ALIMENTICIOS.

La evaluación de las propiedades mecánicas de los alimentos es determinante en todo el proceso de manufactura de los mismos desde la cosecha, recolección, manejo, transporte, procesamiento almacenamiento y consumo, ya que tanto el productor directo, ingeniero, analista de control de calidad, investigador y consumidor, aplican de alguna manera pruebas reológicas y de textura. Por ejemplo, para el ingeniero agrícola es de importancia conocer la deformación y recuperación de los productos agrícolas que son sometidos a esfuerzos considerables por tiempos prolongados durante el transporte a granel desde el campo hasta los centros de producción y/o consumo, al ingeniero en alimentos le interesa el diseño de sistemas adecuados de bombeo, transporte, mezclado y algunas otras operaciones en los alimentos líquidos y semilíquidos, operaciones que dependen de manera determinante de las propiedades mecánicas de las materias primas y de los productos en estados intermedios de manufactura debido a su profundo efecto en la calidad final del producto, como ejemplos, tenemos la reología en las masas de panificación, las cuajadas de queso, las emulsiones cárnicas en la fabricación de embutidos, solo por mencionar algunos.

Para evaluar la calidad de los alimentos, las personas encargadas del control de calidad utilizan pruebas rápidas, sencillas, económicas y repetibles, ya que es necesario que los resultados de dichas pruebas puedan ser obtenidos lo más rápido posible en lugar de utilizar equipos muy costosos y sofisticados que requieran un mayor tiempo de análisis el cual puede retrasar la producción.

Hoy en día las propiedades mecánicas de los alimentos toman una creciente importancia en el desarrollo de nuevos productos, pues el consumidor al tener a su alcance una mayor variedad y competencia en el mercado, se vuelve más exigente al evaluar su calidad y toma en cuenta los aspectos de textura, mismos que el productor debe cuidar para ofrecer al consumidor nuevas y mejores opciones para este atributo.

Para que el consumidor acepte un producto, las propiedades mecánicas junto con la apariencia y el sabor son factores determinantes, ya que juntas forman las características del producto, que lo hacen aceptable o no.

El tacto es la respuesta de los sensores táctiles al estímulo que resulta del contacto entre una parte del cuerpo y el alimento. Por ejemplo, nosotros obtenemos una idea de la textura de un alimento al presionarlo con las manos y sentir cuanto se deforma y como se

recupera, lo que nos puede dar una idea de su frescura, madurez, etc. Durante el proceso de masticado, inicialmente la lengua hace contacto con la superficie del alimento y sentimos respuestas como aspereza, suavidad, humedad. Los dientes y muelas perciben la resistencia a la reducción de tamaño (dureza, fracturabilidad), las partículas del alimento al mezclarse con la saliva y tomar la temperatura corporal cambian notablemente sus propiedades mecánicas para poder ser degullidos (cohesividad, adhesividad, fibrosidad) y la lengua y la faringe evalúan la facilidad con que esta operación se realiza.

El consumidor, al conjuntar todo lo anterior, decide si el alimento es de su agrado y si desea seguir consumiéndolo en el futuro, lo que da como resultado la aceptabilidad de un producto, es por ello que es tan importante la medición de la textura y de algunas otras propiedades mecánicas, que permitan al productor ofrecer un alimento con las mejores características físicas y de calidad. (Casas y Ramírez, 1997)

1.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES

Al incrementar la importancia social y económica de la producción de alimentos, junto con la complejidad de la tecnología de producción, procesamiento, y su manejo de productos altamente perecederos, se requiere de un conocimiento más extenso de sus propiedades físicas y mecánicas con la finalidad de proveer alimentos con mayor calidad. (Casas y Ramírez, 1997)

Las propiedades mecánicas se refieren a la manera en que los materiales responden a la aplicación de fuerzas a consecuencia de las cuales se deforman o fluyen en función del tiempo. La medición de esta respuesta constituye el campo de la **reología** y la **textura** (Rao, 1983)

Existe una gran variedad de pruebas para determinar las propiedades mecánicas de materiales alimenticios, dichas pruebas las podemos clasificar en: **Pruebas de textura**, **pruebas reológicas** Para poder explicar en que consiste cada una de las pruebas, es necesario entender el concepto de **textura** y los factores relacionados con esta propiedad. (Boume, 1982)

1.3. DEFINICIÓN DE TEXTURA

Es difícil dar una definición estricta de **textura** ya que esta propiedad tiene diferentes significados para varias personas. Buscar la definición en el diccionario, solamente nos proporcionará una pequeña ayuda ya que ésta principalmente se refiere a textiles y al arte o acto de tejido, y en general a la disposición o manera de unión de las partículas o

las partes más pequeñas constituyentes de un cuerpo o sustancia. El diccionario Webster da ejemplos de textura para textiles y fibras, tejidos, composiciones artísticas, música, poesía, petrografía, plantas, etc. pero nunca menciona a los alimentos. En vista de la falta de cobertura en el diccionario, los tecnólogos en alimentos se han esforzado por desarrollar su propia definición.

Para algunos autores el término *textura* es aplicado a un particular atributo de calidad de un tipo dado de alimento por ejemplo en el pan, *textura* significa uniformidad en la migaja, y distribución constante en el tamaño de las burbujas de gas pero no incluye suavidad o dureza del pan.

Otros investigadores consideran que la *textura* se aplica a todos los alimentos y se han esforzado por desarrollar definiciones que reflejan un amplio alcance, algunas de estas definiciones son las siguientes:

Con la llegada del *Journal of Textures Studies* en 1959, el término *textura* fue generalmente aceptado como una división principal de la calidad sensorial cubriendo todas las respuestas kinestéticas de los alimentos en cualquier estado que se encuentren. (Casas y Ramírez, 1997)

Textura significa "esas percepciones que constituyen la evaluación de las características físicas de la piel o músculos sensibles de la cavidad bucal, con excepción de la sensación de temperatura y dolor". (Matz 1962)

Textura "es la mezcla de elementos estructurales de alimentos y la manera en la cual estos se registran con los sentidos fisiológicos". (Szczesniak 1963 a.)

Por textura entendemos "esas cualidades de los alimentos que podemos sentir ya sea con los dedos, la lengua, el paladar o los dientes". (Potter, 1968)

Textura "es la composición de esas propiedades (atributos) los cuales surgen de los elementos estructurales de los alimentos y la manera en la cual se registran con los sentidos fisiológicos". (Sherman 1970)

Kramer establece que básicamente las propiedades texturales de los alimentos son limitadas a sensaciones de tacto por la mano y las diferentes partes de la boca aunque en ocasiones la vista (apariencia) y el oído influyen también en la percepción de la *textura*, por lo que puede existir un traslape entre la *textura* y otros atributos sensoriales como el sabor-palatibilidad, percepción visual y táctil de aspereza, etc. Aceptando lo inevitable de dicho traslape, parece haber un acuerdo general que el término *textura* es el término aceptado popularmente para una de las tres propiedades sensoriales primarias

de los alimentos la cual se relaciona completamente con el sentido del tacto y por lo tanto por lo menos potencialmente puede ser medida de manera precisa y objetiva por medios mecánicos.

Muller (1969), proclamó que el término textura debería ser descartado debido a que es confuso ya que significa una propiedad física y también una propiedad de percepción. Él propuso dos términos para tomar el lugar de la palabra textura:

- a) **Reología** Rama de la física que describe las propiedades físicas de los alimentos, y
- b) **Haptaesthesia** (De las palabras griegas que significan Sensación y tacto) es una rama de la psicología que trata con la percepción del comportamiento mecánico de los materiales.

En 1970 Moshenin definió las propiedades mecánicas de los sólidos en términos reológicos.

En 1976 DeMan establece que la textura (refiriéndonos a alimentos) puede ser definida como "la forma en la cual están arreglados los componentes estructurales de un alimento en una estructura macroscópica y microscópica y la manifestación externa de esta estructura". Esta definición toma en cuenta la naturaleza de las partículas y estructuras que constituyen un alimento y al referirse a la manifestación externa de esta estructura se relaciona con el comportamiento de los alimentos tanto en pruebas mecánicas en máquinas como a su comportamiento cuando son comidos (aspectos sensoriales) y es aplicable a materiales líquidos como a sólidos.

Como podemos notar, muchos autores se refieren a ella en términos de la percepción de las propiedades mecánicas de los materiales por medio de los sentidos, principalmente el tacto (manos, lengua, dientes, paladar) aunque intervienen otros como la vista (percepción visual de las características de la superficie: Lisa o rugosa), oído (respuesta sonora al aplicar fuerzas a algún material) por ejemplo el sonido al morder una manzana, galletas o botanas, el sonido al liberarse el CO₂ en dulces, la apariencia visual de aspereza de algunos alimentos, la sensación arenosa en algunas bebidas de chocolate, y las características específicas de algunos productos de confitería (gomoso, chicloso, elástico, etc.).

El término textura se refiere básicamente a la estructura interna de un cuerpo material y a la manifestación física macroscópica de la misma.

Aún cuando no se tenga una definición exacta de textura se puede decir que la textura de alimentos tiene las siguientes características:

- a) Es un grupo de propiedades físicas que se derivan de la estructura del alimento.

- b) Pertenece al apartado de propiedades mecánicas dentro de las propiedades físicas.
- c) Consiste en un grupo de propiedades más que de una propiedad (**propiedades texturales**).
- d) La textura es sensada por los sentidos del gusto y del tacto usualmente en la boca, pero otras partes del cuerpo pueden estar involucradas (frecuentemente las manos).
- e) No están relacionadas con las sensaciones químicas de sabor y olor.
- f) Se miden objetivamente por medio de funciones de masa, distancia y tiempo.

Ya que la textura consiste de un número de diferentes sensaciones físicas, es preferible hablar acerca de "**propiedades texturales**" lo cual infiere a un grupo de propiedades relacionadas en lugar de "textura" la cual infiere a una sola propiedad.

Con lo anterior se puede definir las propiedades texturales de alimentos como "un grupo de características físicas que surge de los elementos estructurales del alimento; son captados por el tacto, se relacionan con la deformación, desintegración y flujo del alimento bajo una fuerza y son medidos objetivamente en función de masa, tiempo y distancia".

1.4. TIPOS DE PRUEBAS PARA LA EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ALIMENTOS.

Existe una amplia variedad de alimentos, así como una gran variedad de tipos de propiedades reológicas y texturales que estos exhiben, es por ello que también existe una amplia variedad de métodos para medir dichas propiedades, lo que hace necesario clasificarlas para un mejor entendimiento. (Bourne 1982)

Podemos clasificar a las pruebas para medir textura de acuerdo al tipo de alimento al que se están aplicando.

Matz (1962) clasificó a los alimentos basándose en sus propiedades texturales en: líquidos, geles, alimentos fibrosos, aglomerados de células turgentes, alimentos untables, estructuras desmenuzables, alimentos cristalinos, aglomerados de vesículas llenas de gas y una combinación de estos. Amerine et. al. 1965 clasificaron a los alimentos en 4 grupos

- a) líquidos
- b) frutas y vegetales
- c) carne
- d) otros alimentos

Son (1972) clasificó a los alimentos basándose en sus propiedades texturales como: alimentos líquidos, alimentos gelosos, alimentos fibrosos, alimentos de forma celular, aceites comestibles y grasas y alimentos en polvo.

La clasificación de las pruebas de textura con base al tipo de propiedades texturales es muy útil, pero quizás un mejor tipo de clasificación es el basado en el tipo de prueba que es usado ya que muchas pruebas son aplicables a más de un tipo de alimento.

Drake (1961) desarrolló un sistema basado en la geometría de los aparatos como sigue:

- 1) Movimiento rectilíneo (paralelo, divergente, convergente)
- 2) Movimiento circular (rotación, torsión)
- 3) Movimiento axialmente simétrico (limitado, ilimitado)
- 4) otros movimientos definidos (curvo, transversal)
- 5) Movimiento indefinido (tratamiento mecánico, tratamiento muscular).

La Tabla No. 1.1, muestra los tipos de pruebas que son usados para medir textura en alimentos, estas pueden ser divididas en pruebas objetivas las cuales son realizadas por instrumentos y subjetivas que son realizadas por personas. Las pruebas objetivas pueden ser divididas a su vez en pruebas directas que miden propiedades texturales reales de materiales e indirectas que miden propiedades físicas que pueden ser correlacionadas con otras propiedades texturales. Las pruebas subjetivas se clasifican en orales las cuales son desarrolladas en la boca y no orales en las cuales otras partes del cuerpo diferentes a la boca son usadas para medir las propiedades texturales.

Tabla No 1.1
TIPOS DE PRUEBAS PARA MEDIR TEXTURA EN ALIMENTOS

Objetivas		Subjetivas	
Directas	Indirectas	Orales	No orales
Fundamentales Empíricas Imitativas	Ópticas Químicas Acústicas Otras	Mecánicas Geométricas Químicas	Dedos Manos Otras

El estudio de las propiedades mecánicas de los materiales se efectúa a través de diferentes tipos de pruebas las cuales podemos clasificar en pruebas fundamentales, empíricas, imitativas y sensoriales (Scott Blair 1958). A continuación se describe en que consiste cada uno de ellas:

1.4.1. PRUEBAS FUNDAMENTALES A través de estas podemos obtener las funciones materiales, es decir aquellas que solamente dependen del material y no del instrumento y el método. En este tipo de pruebas los resultados se expresan en términos de potencias de masa, longitud y tiempo y todas las variables son conocidas y controladas; dependiendo de la complejidad del material, en este tipo de pruebas se pueden obtener hasta 10 parámetros o más.

Para llevar a cabo este tipo de pruebas se requiere de instrumentos sofisticados y costosos es por eso que estos métodos son usados principalmente en investigación básica como

apoyo o complemento para determinar la estructura de los materiales, cuando se quiere caracterizar rigurosamente el comportamiento del mismo, para determinar punto de gelificación, para diseño, selección y control de equipo de proceso y en algunos casos en el desarrollo de nuevos productos. En este tipo de pruebas son utilizados viscosímetros y reómetros.

Dada la heterogeneidad de las muestras en alimentos se complica la aplicación de las pruebas fundamentales debido a la dificultad de asegurar que los perfiles de velocidad o deformación son iguales, lo complejo de tomar muestras con dimensiones específicas y homogéneas requeridas por el instrumento, lo cual es una limitante para su aplicación. Otro factor a considerar es el hecho de que las pruebas fundamentales manejan esfuerzos, deformaciones y tiempos diferentes a los que se utilizan en los procesos de manufactura y durante el consumo de los alimentos. El manejo de la muestra para colocarla en el reómetro y la historia previa de la misma también son factores determinantes en los resultados de las pruebas fundamentales, en particular en materiales que presentan histéresis. Para obtener resultados repetibles y válidos, es necesario estandarizar y controlar la historia de la muestra y su manejo, ya que de lo contrario la prueba pierde validez. Por lo anterior, podemos decir que las pruebas fundamentales son útiles cuando deseamos conocer el estado inicial del alimento (con mínimo cambio en su estructura).

Una vez superadas las dificultades inherentes a la muestra, la interpretación de los resultados y su relación con las variables involucradas en la investigación y otras propiedades físicas, fisicoquímicas y de textura es relativamente fácil en los fluidos sin propiedades elásticas, pero estas se complican en los fluidos y sólidos viscoelásticos. La extrema complejidad estructural de algunos alimentos ocasiona que bajo pruebas fundamentales los modelos matemáticos que describen su comportamiento sean muy complejos y el hallar la relación entre la estructura, tipo de enlaces y el comportamiento reológico es una tarea ardua. Por lo mismo es difícil encontrar en la bibliografía información de pruebas fundamentales en sistemas complejos. Por lo general lo que se reporta es en sistemas modelo sencillos tales como geles de proteínas o polisacáridos en condiciones controladas, emulsiones sencillas o efectos de un componente que influye en el comportamiento reológico del sistema.

1.4.2. PRUEBAS EMPÍRICAS Se efectúan con instrumentos que con frecuencia son diseñados o contruidos para un material específico, por lo que los resultados son función del instrumento, método, la carga aplicada, la velocidad de aplicación de la carga, la geometría, dimensiones y orientación de la muestra y las condiciones experimentales lo

que ocasiona que no sean reproducibles ni puedan expresarse en términos de cantidades reológicas fundamentales (potencia de masa, longitud y tiempo). Para este tipo de pruebas los instrumentos utilizados son sencillos y económicos.

Estas pruebas generalmente arrojan un dato como resultado que puede ser distancia, fuerza, área, tiempo, velocidad; en ocasiones son específicos para cada tipo de material y no siempre están perfectamente definidos (dureza, cohesividad, adhesividad, pegajosidad) debido a que es difícil traducirlos de un idioma a otro. Estos resultados son válidos y comprables bajo el mismo aparato, método, condiciones experimentales y geometría de la muestra. Las variables que intervienen no siempre son conocidas ni controladas.

En las pruebas empíricas, los materiales son sometidos a una deformación bajo compresión, tensión penetración corte, flujo, extrusión o una combinación de ellas. Algunos ejemplos de este tipo de instrumentos son:

- Penetrómetros,
- Gelómetro de Bloom,
- Ridgelímetro para pectinas
- Consistómetro de Bostwick
- Aparato de Warner- Bratzler para carnes
- Tenderómetro
- Prensa Kramer
- Fibrómetros

1.4.3. PRUEBAS IMITATIVAS Son aquellas que tratan de imitar las operaciones humanas sobre los materiales con la finalidad de juzgar su comportamiento mecánico (masticación, presión con los dedos, etc.) y aunque las fuerzas de reacción desarrolladas por la muestra representan las reacciones humanas, los movimientos complicados y los complejos esfuerzos desarrollados hacen imposible la representación técnica de los resultados.

Al igual que en las pruebas empíricas, en las imitativas influyen las dimensiones, forma orientación del material, el dispositivo utilizado, el procedimiento, etc. Dentro de estos instrumentos podemos mencionar:

- Untómetros para mantequilla,
- Farinógrafo y amilógrafo para masas,
- Tenderómetro de mandíbula de Volodkevich
- Tenderómetro de dentadura del M.I.T. (El cual ofrece la ventaja de medir un espectro de parámetros más que una característica aislada).
- Máquina Universal de deformación INSTRON

Dado el acelerado avance de la tecnología, la electrónica y la computación, se han desarrollado modernos texturómetros para alimentos que son más compactos que el

INSTRON pero que operan bajo el mismo principio. En todos estos equipos a velocidad controlada, se establece una deformación del material y se mide como respuesta del mismo la fuerza en función del tiempo o viceversa. Los texturómetros cuentan con una amplia variedad de dispositivos de prueba tales como conos, placas, agujas, cilindros, esferas, cuchillas, celdas de corte y extrusión entre otros y pueden efectuar las pruebas bajo tensión y compresión.

El grupo pionero de General Food Corporation (Friedman Szczesniak) que desarrolló el Texturómetro General Food, generó el llamado **Análisis de Perfil de Textura (TPA)** que consiste en comprimir un cubo del alimento de 1.2cm por lado a 25% de su altura original dos veces; como resultado se obtiene una curva fuerza-tiempo. De este análisis se extraen siete parámetros texturales. Además de esta prueba típica, los texturómetros actuales tienen amplias posibilidades de efectuar muchos tipos de pruebas empíricas e imitativas y ofrecen al usuario la posibilidad de diseñar la prueba que considere más representativa de lo que desea medir en un producto específico.

Las pruebas imitativas que al inicio trataron de simular las operaciones efectuadas por el hombre al masticar los alimentos, se han ido alejando de este objetivo para tratar de acercarse más a lo que es una prueba fundamental o empírica.

Las pruebas imitativas y las empíricas proporcionan herramientas para evaluar las propiedades texturales de manera instrumental y objetiva.

Uno de los parámetros de textura con frecuencia más evaluado en investigación y en la industria de alimentos es la dureza usando un Penetrómetro Universal como equipo. A continuación se describe como se desarrolla esta prueba así como la operación del equipo, y el método de análisis e interpretación de resultados.

1.5. PRUEBAS DE PENETRACIÓN

Las pruebas de penetración son pruebas empíricas de textura ampliamente utilizadas en la industria para el control de la calidad y desarrollo de productos, como en el caso de los alimentos (grasas, mantequillas, quesos, geles, pan, frutas, chocolate, etc.), en la industria química (grasas, ceras, lubricantes), así como en la industria farmacéutica (cremas, cosméticos, polvos, tabletas, etc.). Entre otras pruebas empíricas usadas para evaluar propiedades de textura de los diversos materiales, podemos encontrar las pruebas de penetración o punción.

La penetrometría se refiere a la penetración o sumergimiento de un cuerpo o dispositivo en el material de prueba. Cuando estandarizamos las condiciones de prueba, es posible

obtener importante información acerca de la consistencia de un producto. Actualmente podemos encontrar en el mercado, instrumentos diseñados para tal fin, conocidos como "**penetrómetros**" los cuales han sido diseñados especialmente para diferentes productos tales como: grasas, frutas, etc. Debido a que son instrumentos de bajo costo, sencillos de usar, además de que se pueden obtener resultados rápidamente, son aparatos muy utilizados en la industria ya sea para el control de calidad o para el desarrollo de productos. En la industria de los alimentos, su aplicación más amplia es en geles y en materiales plásticos como grasas y chocolates entre otros. El penetrómetro Universal es el instrumento oficial para la normalización de productos tales como grasas, ceras y otros derivados del petróleo, inclusive existen dispositivos ya normalizados en cuanto a peso, materiales y dimensiones que son proporcionados por los diferentes fabricantes de estos aparatos.

En las pruebas de penetración, el material en estudio es sometido a una combinación de compresión y cizallamiento. Como resultado puede producirse flujo en materiales sólidos o semisólidos debido a la debilidad de la estructura y en materiales de estructura más fuerte, el material se cizala y se comprime además del flujo. En materiales sólidos la prueba es destructiva.

En el mercado están a la venta penetrómetros muy similares al ASTM (American Society of Testing Materials) de los cuales uno de los más comerciales es el Penetrómetro Universal manufacturado por Precision Scientific, mismo que es usado ampliamente en productos como el petrolato y otras grasas derivadas del petróleo, margarina, mantequilla, algunas otras grasas sólidas y muchos otros productos plásticos sólidos y semisólidos. (Casas y Ramírez, 1997)

1.5.1. PENETRÓMETRO UNIVERSAL

Es el tipo de penetrómetro más comúnmente usado, su diseño está basado en el penetrómetro de ASTM. Una de las marcas que comercializa el Penetrómetro Universal es Precision Scientific aunque podemos encontrar otras como Hombolt Mfg. El Penetrómetro Universal opera bajo el principio de peso constante (velocidad variable). Mide distancia, básicamente en compresión aunque también existe cizallamiento y flujo (materiales plásticos) (Casas y Ramírez, 1997)

DESCRIPCIÓN DEL PENETRÓMETRO UNIVERSAL

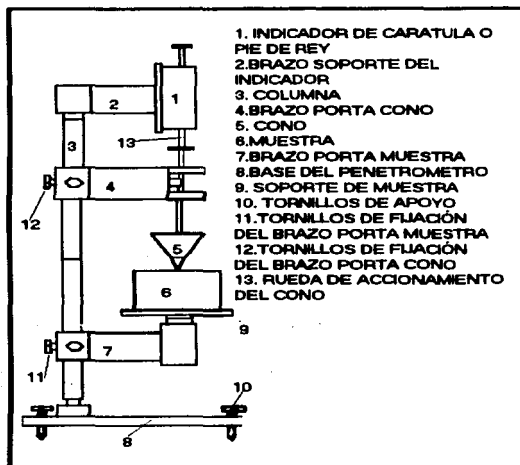
El penetrómetro consta de un soporte mediante el cual se sostiene una varilla vertical de 3/16 in de diámetro y con un peso de 47.5g que puede ser detenida o liberada para caer libremente bajo la fuerza de la gravedad. Un indicador de carátula de 4 pulgadas de

diámetro está conectado a un medidor de profundidad (altura, distancia) y se usa para medir manualmente la distancia que la varilla cae después de ser liberada, con una sensibilidad de 1/10 de mm. El indicador de carátula está graduado de 0-380 mm. Las medidas de penetración pueden ser efectuadas hasta una profundidad de 620 mm ya que la aguja puede dar 1.66 revoluciones. Todo este dispositivo está unido a un soporte con cremallera que permite subir y bajar a fin de ajustar la altura sobre la muestra.

Accesorios y dispositivos del Penetrómetro Universal.

1. Cronómetro
2. Aguja ASTM D-5, 2.5g
3. Recipiente para derivados del petróleo de 16 oz.
4. Aguja para penetración de grasas ASTM D-1321, 2.5g
5. Cono de aluminio 35g
6. Cono de Bronce ASTM D-217 y Dp37, 102.5g
7. Cono y émbolo ¼ ASTM d1403, 9.38g
8. Cono Universal 102.5g

Figura No. 1.1
PENETRÓMETRO UNIVERSAL



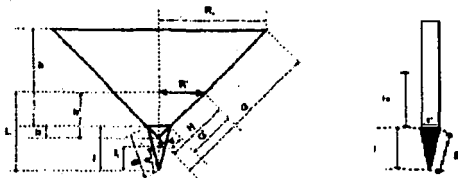
Dimensiones de los dispositivos.

El penetrómetro Universal (Figura No. 1.1) usado en este trabajo, consta básicamente de los siguientes dispositivos de penetración: Dos conos uno de aluminio y otro de latón, ambos conos tienen las mismas dimensiones y geometría pero varían en peso, y una aguja de acero inoxidable Se cuenta además con dos pesas (50 y 100g) para adicionar peso extra al dispositivo, una varilla porta conos y agujas, la cual tiene un peso de 47.5g mismo que debe ser sumado al peso del dispositivo utilizado y al peso adicional utilizado. En la Tabla No. 1.2 son presentadas las dimensiones de los dispositivos de penetración, y en la Figura No. 1.2 son representados esquemáticamente.

Tabla No. 1.2
DIMENSIONES DE LOS DISPOSITIVOS DEL PENETRÓMETRO UNIVERSAL

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR
a) CONO		
CONO 45 TRUNCADO		
ÁNGULO	α	45°
RADIO	R_1	3.35 cm
RADIO TRUNCACION	R	0.4 cm
ALTURA	H	3.35 cm
GENERATRIZ	G	4.773 cm
ALTURA TRUNCACION	B	0.4 cm
ÁREA	A	49.82 cm ²
PESO	M	35g
CONO 15		
ÁNGULO	β	15°
RADIO	R	0.4 cm
GENERATRIZ	G	1.55 cm
ALTURA	I	1.497 cm
ÁREA	A_1	1.948 cm ²
b) AGUJA		
ÁNGULO	θ	5.8°
RADIO	R	0.05 cm
GENERATRIZ	G	0.49 cm
ALTURA PARTE CONICA	I	0.487 cm
ÁREA PARTE CONICA	A	0.0769 cm ²
PESO	M	2.5 g

Figura No.1.2
REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS DISPOSITIVOS DE PENETRACIÓN
PENETRÓMETRO UNIVERSAL



a) Cono

b) Aguja

1.5.2. OPERACIÓN DEL PENETRÓMETRO UNIVERSAL

Para llevar a cabo las determinaciones de dureza cuando se emplea el penetrómetro Universal, se debe seguir el siguiente procedimiento de operación

1. Se une a la varilla el dispositivo de penetración adecuado a la muestra (conos o agujas).
2. Se libera la varilla, se sube y se asegura.
3. Se coloca sobre la base el material a ser evaluado, por medio de la cremallera se baja manualmente hasta colocar la punta del dispositivo a una altura tal que justo haga contacto con la muestra con ayuda de un tornillo micrométrico. El indicador debe marcar cero.
4. - Se libera la varilla y se deja que se sumerja en la muestra por 5 segundos y se vuelve a asegurar o detener.
5. - Manualmente se empuja hacia abajo el medidor de profundidad hasta que haga contacto con la parte superior de la varilla y se toma la lectura del indicador.

Una vez tomada la lectura, se procede a realizar el cálculo de la dureza como a continuación se describe.

1.5.3. DESARROLLO DE LAS FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE DUREZA CON PENETRÓMETRO UNIVERSAL

Puesto que la dureza se define como la fuerza por unidad de área de contacto, se hace necesario calcular el área de contacto entre la muestra y el dispositivo en el tiempo establecido para la penetración. El área de contacto estará entonces en función de la distancia penetrada y la forma geométrica del dispositivo.

1.5.4. CÁLCULO DE LA DUREZA USANDO UN CONO COMO DISPOSITIVO DE PENETRACIÓN

El cono tiene las siguientes características: un cono de 45° truncado; en esta truncación tiene insertado un cono de 15° (Figura No. 1a), las dimensiones de los dos conos las podemos observar en la tabla No. 1.2.

En el momento que se está realizando una prueba de penetración y se usa como dispositivo de penetración un cono, se pueden tener dos casos:

- Solamente penetra a la muestra una parte del cono de 15°
- Penetra a la muestra todo el cono de 15° y parte del cono truncado de 45°

A continuación se presenta el desarrollo de las fórmulas para el cálculo de la dureza en ambos casos.

La dureza está dada por la fuerza que aplica el cono al penetrar dividida entre el área del dispositivo que penetra y ésta a su vez depende de la profundidad de penetración (lectura de la carátula) y de las dimensiones del cono.

$$D = \frac{F}{A} = \frac{m_T a_g}{A} \quad (1a)$$

donde:

D = dureza (Dinas/cm²)

A = área total del dispositivo que penetró a la muestra (cm²)

m_T = peso total del dispositivo incluyendo cono, varilla y peso adicional utilizado (g)

a_g = aceleración de la gravedad (981 cm/s²)

caso a) Solamente penetra a la muestra una parte del cono de 15°

La lectura (L) en la carátula indica la profundidad de penetración, con este valor se obtiene el área del cono de 15° hasta dicha profundidad haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$A_1 = \pi g_1 r_1 \quad (2a)$$

donde:

g_1 = generatriz del cono a la profundidad de penetración L (cm)

r_1 = radio del cono a la profundidad de penetración L (cm)

Es necesario calcular (g_1) y (r_1) en función del ángulo del cono y la profundidad de penetración que son los valores conocidos.

$$\text{Tan}\beta = \frac{r_1}{L} \quad (3a)$$

$$r_1 = L \text{ Tan}\beta \quad (4a)$$

Una vez que se conoce el valor de (r_1) se procede a calcular (g_1) mediante la siguiente ecuación:

$$g_1 = (r_1^2 + L^2)^{1/2} \quad (5a)$$

Sustituyendo los valores de (g_1) y (r_1) en la ecuación (2a) se obtiene el valor del área A_1 la cual se sustituye en la ecuación (1a) junto con el valor del peso total utilizado (m_2) para obtener el valor de la dureza (D) .

Caso b) Penetra a la muestra todo el cono de 15° y parte del truncado de 45°

La lectura L_1 indica la profundidad de penetración. Debido a que penetró todo el cono de 15° (cuya altura l se conoce), $(L-l+b)$ será la altura del cono de 45° que penetró.

El área total penetrada será el área del cono de 15° (A_1) más el área del cono de 45° hasta la altura dada por $(L-l+b)$, que se le asignará el nombre (A_2), menos el área de la truncación del cono de 45° (A_3).

$$A_T = A_1 + A_2 - A_3 \quad (6a)$$

$$A_1 = \pi g r = 1.948 \text{ cm}^2 = \text{constante.} \quad (7a)$$

$$A_2 = \pi R' H \quad (8a)$$

Debido a que (R') no se conoce, es necesario poner el área en función de la altura de penetración.

Por tratarse de un cono de 45°, $R = h$.

$$A_2 = \pi h^2 \quad (9a)$$

$$H = (2h^{-2})^{1/2} = h \cdot \sqrt{2} \quad (10a)$$

Sustituyendo la ecuación (10a) en (9a)

$$A_2 = \sqrt{2} \pi h^3 \quad (11a)$$

como $h' = L-l+b$

$$A_2 = \sqrt{2\pi(L-l+b)^2} \quad (12a)$$

Área de la truncación del cono de 45°

$$A_3 = \pi g' r \quad (13a)$$

$$g' = (r^2 + b^2)^{1/2} = (2r^2)^{1/2} = \sqrt{2} r = 0.5656cm^2 \quad (14a)$$

$$A_3 = \sqrt{2}\pi r^2 = 0.710cm^2 \quad (15a)$$

Una vez calculadas las áreas A_1 , A_2 y A_3 sus valores se sustituyen en la ecuación (6a) para calcular el área total penetrada y el valor del área es sustituido en la ecuación (1a) junto con el peso total empleado en la prueba para obtener el valor de la dureza (D).

1.5.5. CÁLCULO DE LA DUREZA USANDO UNA AGUJA COMO DISPOSITIVO DE PENETRACIÓN

En el caso de la aguja el problema se reduce a sumar el área de la parte cónica ($0.0769cm^2$), al área lateral de la varilla ($2\pi r(L-l)$) considerando la distancia penetrada, para tener el área total, entonces se puede sustituir en la ecuación (1a) y así obtener el valor de la dureza (D).

Como se mencionó previamente, uno de los usos más importantes del Penetrómetro Universal es para la evaluación de textura de materiales plásticos (aquellos que no fluyen hasta que se aplica un esfuerzo de determinada magnitud conocido como esfuerzo inicial o de cedencia). Se ha discutido en la literatura sobre el significado exacto de la lectura del penetrómetro o los parámetros derivados de la misma y si realmente proporciona una medida del punto de cedencia, la consistencia o una combinación de éstas. Aún cuando esto no ha sido completamente establecido, ha sido de gran utilidad y aplicación no sólo en el campo de las grasas plásticas sino en una amplia variedad de productos. Carbonell, Costell y Durán (1989) recomiendan que para medir "esfuerzos de cedencia" la penetrometría es adecuada cuando éste se encuentra entre 10^2 y 10^4 Pa, mientras que para valores menores a 10^2 se recomiendan métodos de cizalla.

El valor de penetración se define como "la profundidad de penetración en 1/10 de mm a 25°C con un dispositivo de penetración de peso conocido por 5 segundos", pero dependiendo si el material es sólido, semisólido o fluido y del objeto de la prueba la medida se puede reportar y efectuar de diferentes formas.

1.4. PRUEBAS REOLÓGICAS FUNDAMENTALES PARA COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO

Reología es una rama de la física definida como: "La ciencia de la deformación y flujo de materiales", la cual incluye el estudio de la deformación elástica y otros fenómenos no necesariamente asociados con el flujo. El campo de la reología abarca las propiedades mecánicas de sólidos, semisólidos, y líquidos. (Boume, 1982)

La reología estudia las propiedades mecánicas de los materiales por medio de pruebas fundamentales, el resultado sólo depende del material (funciones materiales) y no del instrumento ni método con que se evalúan.

La materia es deformada o empieza a fluir, solamente cuando una fuerza actúa sobre ella, dicha fuerza puede aplicarse deliberadamente, accidentalmente o puede ser continua, como en el caso de la gravedad. Tres parámetros que están relacionados con la reología son la fuerza, la deformación y el tiempo. (Deman; Voisey; Rasper y Stanley, 1974)

1.4.1. MATERIALES IDEALES

Un material elástico ideal es aquel que se deforma instantáneamente con la aplicación de una fuerza, e instantáneamente regresan a su forma original cuando la fuerza es retirada. Para ciertos cuerpos sólidos, la relación entre fuerza y deformación es representada como una línea recta que parte desde el origen hasta el llamado límite de elasticidad, de acuerdo con la ley de Hooke.

$$\tau = E\gamma \quad (1b)$$

Donde el factor de proporcionalidad (E), para una fuerza aplicada perpendicularmente a un área definida por el esfuerzo, es llamado "módulo de elasticidad" o módulo de Young. Para una fuerza de cizallamiento o una fuerza aplicada paralelamente a un área definida por el esfuerzo, el "módulo de rigidez" o módulo de Coulomb (G), es una medida de la resistencia del material al cambio en su forma y se define como la razón del esfuerzo cortante-deformación cortante.

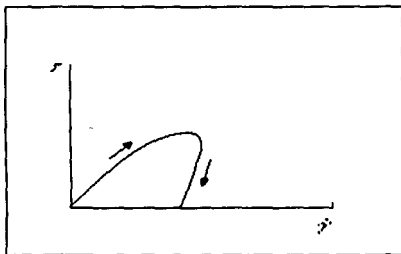
$$G = \tau/\gamma \quad (2b)$$

Para sólidos elásticos ideales, el esfuerzo o deformación serán independientes del tiempo.

Dado que la deformación es proporcional en la fuerza aplicada y para su cálculo se consideran unidades de área y de longitud, el módulo elástico es una constante fundamental del material.

Para cuerpos que muestran elasticidad retardada, la deformación es una función tanto del esfuerzo como del tiempo (Figura No. 1.3). Cuando el esfuerzo aplicado se reduce, la deformación correspondiente es mayor en la parte que baja en la curva; cuando el esfuerzo llega a cero, la deformación sigue siendo un valor finito el cual retomará lentamente a cero. No hay deformación permanente.

Figura No. 1.3
CUERPO ELÁSTICO RETARDADO



Fuente: DeMan y colaboradores 1978

1.6.2. VISCOELASTICIDAD

Las teorías clásicas que describen el comportamiento mecánico, fueron desarrolladas basadas en el modelo elástico ideal (para materiales sólidos) y viscoso ideal (para materiales líquidos). Sin embargo, estas teorías basadas en materiales ideales no son fácilmente extensibles para explicar el comportamiento de muchos materiales reales y mucho menos en el caso de alimentos. Al combinar el comportamiento viscoso y elástico, es posible explicar algunos de los comportamientos de los materiales reales observados. Este comportamiento combinado muestra ambas propiedades y es generalmente llamado **comportamiento viscoelástico**. Una de las características importantes del comportamiento viscoelástico es la dependencia de las propiedades del material con el tiempo, además de la temperatura y el contenido de humedad. (Bourne, 1982)

En los materiales viscoelásticos la deformación y recuperación no ocurre de manera instantánea y presentan características tanto de sólidos como de líquidos cuando se les somete a esfuerzos y deformaciones pequeñas; el comportamiento sólido se presenta en tiempos cortos y el líquido en largos. (Demian; Volsey; Rasper; y Stanley, 1997)

La viscoelasticidad trata con sólidos y líquidos y los efectos combinados de ambos, el comportamiento de sólidos puede ser explicado por teorías de elasticidad y viscoelasticidad, puesto que las propiedades mecánicas resultan del comportamiento de los materiales que experimentan deformación y/o flujo, el cual se debe a la acción de las fuerzas. Por esta razón un entendimiento de los conceptos básicos de fuerza, desplazamiento, deformación, y esfuerzo (stress) es importante (Fizman; Costell y Duran, 1983)

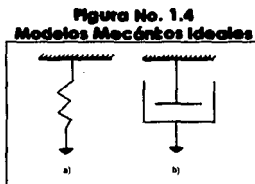
Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades de un material viscoelástico son funciones del tiempo en que la deformación y el esfuerzo han sido aplicados. Estos materiales pueden presentar uno de los dos comportamientos viscoelásticos lineal y no lineal. Los materiales viscoelásticos lineales, son aquellos en los cuales el valor de sus parámetros reológicos es independiente de la magnitud del esfuerzo aplicado; esto significa que no importa la magnitud del esfuerzo o la deformación aplicada, siempre habrá una relación lineal entre ellos. Algunos materiales presentan comportamiento viscoelástico lineal a cualquier deformación, mientras que otros solo lo presentan en intervalos de deformación muy pequeños y poseen un límite por arriba del cual ya no responden linealmente como es el caso de la mayoría de los alimentos.

Si una muestra es sometida a un esfuerzo mayor que el esfuerzo de cedencia, esta se deformará; Cuando el esfuerzo se retira, un cuerpo viscoso ideal (fluido) permanecerá completamente deformado, esto lo podemos representar mediante el modelo del pistón (Figura No. 1.4b). Un cuerpo elástico ideal después de la descarga regresará completamente a su posición inicial antes del inicio de la deformación; lo cual se puede observar con el modelo del resorte (Figura No. 1.4a). La energía de deformación que es aplicada a la muestra de manera externa es completamente almacenada por el cuerpo elástico y después de la descarga se utiliza para la recuperación del material (efecto de memoria). Los fluidos viscoelásticos se recuperan en forma retardada y solo parcialmente. En los sólidos viscoelásticos, la deformación es casi completa pero retardada.

En los materiales viscoelásticos no lineales, sus propiedades mecánicas son función del tiempo y la magnitud del esfuerzo aplicado. Ellos pueden poseer una zona no elástica y en general se representan por relaciones no lineales entre el esfuerzo y la deformación relativa. (Rao, 1983)

Para poder definir las propiedades reológicas en un número de parámetros físicos y obtener una evaluación comprensiva del material, y como se comportará bajo ciertas condiciones de esfuerzo y deformación, se ha recurrido al empleo de modelos reológicos.

Un modelo reológico combina los elementos básicos de los materiales ideales (sólido de Hooke y líquido Newtoniano). El elemento elástico está representado por un resorte y el elemento viscoso por un pistón sumergido en un líquido viscoso (Figura. No. 4).

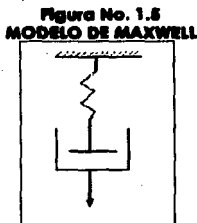


Elemento elástico ideal (a), y elemento viscoso ideal (b)

La combinación de estos elementos en diferentes arreglos, da como resultado los diferentes modelos mecánicos que explican el comportamiento reológico de diversas sustancias complejas como los materiales viscoelásticos. Dos modelos viscoelásticos básicos son el modelo de Maxwell y el modelo de Kelvin-Voigt.

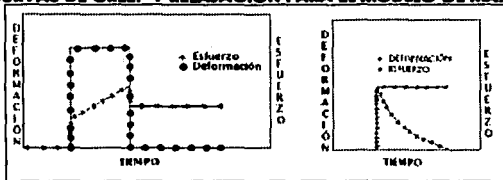
1.6.3. MODELO DE MAXWELL

Este modelo consta de un pistón y un resorte conectados en serie (Figura no. 1.5); bajo esfuerzo constante (prueba de Creep), el resorte se deforma inmediatamente, pero el amortiguador reacciona de manera retardada. Cuando se libera el esfuerzo, el resorte regresa de inmediato a su posición original, mientras que el amortiguador permanece completamente estirado. Por lo tanto, no hay una recuperación completa. La porción recuperada corresponde al elemento elástico y la deformación que permanece, al elemento viscoso del material. (Figura No. 1.6a).



Fuente: DeMan y colaboradores 1976

Figura No. 1.6
CURVAS DE CREEP Y RELAJACIÓN PARA EL MODELO DE MAXWELL



a) Creep

b) Relajación

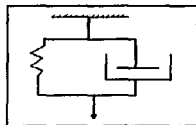
Fuente: Apuntes sobre viscoelasticidad Casas A. N. B. (1997)

1.6.4. SÓLIDO VISCOELÁSTICO (MODELO KELVIN-VOIGT)

El sólido viscoelástico típico puede ser representado por una combinación en paralelo del resorte y el amortiguador. Este modelo es conocido como el modelo de Kelvin-Voigt. (Figura No. 1.7).

Bajo esfuerzo constante (prueba de Creep), existe una deformación retardada, ya que el estiramiento inmediato del resorte es moderado o limitado por el amortiguador. Cuando el esfuerzo es liberado, el material regresa al estado inicial (retardado por el amortiguador). En este caso la deformación es reversible.

Figura No. 1.7
MODELO DE KELVINVOIGT

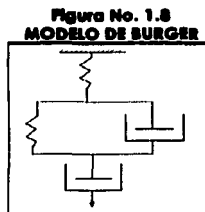


Fuente: DeMan y colaboradores 1976

En el cuerpo de Kelvin-Voigt el esfuerzo es la suma de los dos componentes de los cuales uno es proporcional a la deformación y el otro a la velocidad de cizallamiento. Dado que los elementos están en paralelo, éstos se deben mover juntos. En el modelo de Maxwell la deformación está compuesta de dos partes: una puramente viscosa y otra puramente elástica. Aunque estos dos modelos representan el comportamiento viscoelástico, reaccionan diferente en experimentos de relajación y de fluencia (Creep). Cuando una carga constante se aplica en una prueba de Creep, a un modelo de Kelvin-Voigt, se obtiene una deformación final de estado estable dado que el elemento de resorte resiste

el movimiento, el modelo de Maxwell continua fluyendo bajo estas condiciones debido a que el elemento viscoso no está limitado por el resorte. Cuando la carga se elimina, el primer modelo se recupera completamente pero no instantáneamente, y el segundo no se recupera completamente pero sí instantáneamente.

Una variedad de modelos se pueden construir para representar el comportamiento reológico de un material viscoelástico: colocando un número de elementos Kelvin-Voigt en serie, o un número de elementos de Maxwell en paralelo, se pueden obtener los modelos generalizados respectivos. La combinación de elementos Kelvin-Voigt y Maxwell en series es llamada Modelo de Burger (Figura No. 1.8).



Fuente: DeMan y colaboradores 1976

1.6.5. PRUEBAS ESTÁTICAS

Se basan en la aplicación de esfuerzos o deformaciones constantes al material y a la medición de la respuesta (deformación o esfuerzo respectivamente) en función del tiempo. La interpretación de la respuesta se hace basándose en modelos mecánicos que contienen elementos elásticos y viscoso acoplados en diferentes arreglos y se obtienen como resultados, los tiempos de retardo, tiempos de relajación, el módulo elástico (G) y el "compliance" (J) o deformación relativa al esfuerzo. (Demam; Voisey; Rasper y Stanley, 1974)

Entre las pruebas estáticas podemos encontrar a las pruebas de relajación donde la deformación es constante y a las pruebas de fluencia o pruebas de "Creep" en donde el esfuerzo es constante.

1.7. PRUEBAS DE RELAJACIÓN

Esta prueba puede ser fácilmente efectuada en un material cuyo comportamiento es representado por el modelo de Maxwell que consiste en acoplar en serie un elemento

elástico y un viscoso. En esta prueba se estudia la relación tensión - tiempo. Se aplica una deformación constante (γ) y se mide la relajación del esfuerzo con respecto al tiempo.

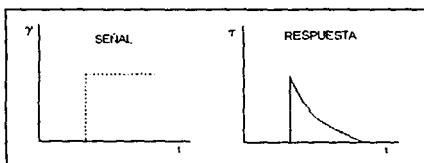
En las pruebas de relajación, un material es sometido a una deformación repentina y el resorte se estira generando un esfuerzo necesario para mantener dicha deformación. Una vez que el esfuerzo instantáneo ha sido generado y el resorte extendido, el pistón comienza a fluir y a liberar esfuerzo impuesto en el resorte, como resultado, el esfuerzo decrece con respecto al tiempo y hasta llegar a cero. (Figura No. 1.9). El punto en el cual el esfuerzo ha caído a $1/e$. (e es la base del logaritmo natural o 36.7% del valor original), es llamado tiempo de relajación. Cuando se elimina la deformación a un tiempo t , el esfuerzo regresa a cero.

Al estar en serie, ambos elementos (elástico y viscoso) se encuentran sometidos al mismo esfuerzo y las deformaciones son aditivas.

En las pruebas de relajación una deformación constante es aplicada y el esfuerzo requerido para mantener esta deformación es seguido como una función del tiempo. Los resultados normalmente se expresan en términos de relajación de fuerza donde:

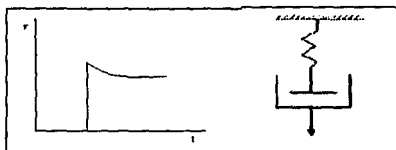
$$G(t) = \text{esfuerzo } (\tau) / \text{deformación } (\gamma)$$

**Figura No. 1.9
PRUEBAS DE RELAJACIÓN**



Fuente: DeMan y colaboradores 1976

**Figura No. 1.10
CURVA DE RELAJACIÓN.
MATERIALES VISCOELÁSTICOS**



Fuente: DeMan y colaboradores 1976

En la mayoría de los materiales viscoelásticos en una prueba de relajación el esfuerzo decrece en función del tiempo a un esfuerzo constante diferente de cero (Figura No. 1.10). En tal caso, el modelo de Maxwell no describe apropiadamente el comportamiento por lo que debe acoplarse un elemento elástico adicional en serie. A este modelo se le conoce como modelo de Poynting-Thomson.

Otros modelos de relajación son el modelo de Maxwell Generalizado que combina varios elementos de Maxwell en paralelo con un resorte que da lugar al esfuerzo residual y el de Maxwell de cuatro elementos que combina dos elementos Maxwell, sin esfuerzo residual.

1.8. PRUEBAS DE FLUENCIA O "CREEP COMPLIANCE"

Una de las manifestaciones de los materiales viscoelásticos es que experimentan el comportamiento de Creep (fluencia o desilzamiento), su deformación continúa bajo un esfuerzo o carga constante. Es necesario recalcar la diferencia entre esfuerzo y carga (fuerza) especialmente cuando se trata de alimentos altamente deformables debido al progresivo cambio del área transversal de la muestra. Por esta razón una carga constante como un peso muerto produce progresivamente una deformación creciente en tensión unaxial y una deformación decreciente en compresión.

En una prueba de Creep el material se somete a un esfuerzo constante y se mide su deformación respecto al tiempo. Se define el creep compliance (J) como la deformación relativa al esfuerzo aplicado como:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau} \quad (1c)$$

τ = Esfuerzo constante.

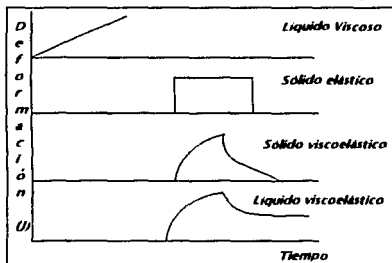
$\gamma(t)$ = deformación relativa en función del tiempo.

1.8.1. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES VISCOSOS, ELÁSTICOS Y VISCOELÁSTICOS EN PRUEBAS DE CREEP

Si se realiza una prueba de Creep a un fluido viscoso, en el momento que es aplicado el esfuerzo a la muestra, esta inmediatamente comienza a deformarse en forma proporcional al esfuerzo, sin embargo cuando el esfuerzo es retirado, la muestra permanece deformada y no regresa a su forma original. Para el caso de un sólido elástico cuando el esfuerzo es aplicado, la muestra se deforma instantáneamente hasta un cierto valor de deformación (γ_0), después de alcanzar este valor la muestra continúa con esta deformación constante hasta el momento en el que el esfuerzo es retirado y el valor de la

deformación regresa instantáneamente a cero. En los materiales viscoelásticos al tiempo cero, la carga aplicada resulta en una deformación γ , la cual se incrementa con el tiempo. Cuando la carga se elimina al tiempo t_i , la deformación decrece inmediatamente, (lo que se indica con la porción de línea vertical de la curva al tiempo t_i , y continúa decreciendo con el tiempo. En muchos materiales el valor de γ nunca alcanza el cero y resulta una deformación permanente γ_p (fluidos viscoelásticos) (Figura No. 1.11).

**Figura No. 1.11
EXPERIMENTO DE FLUENCIA (CREEP)**



1.8.2. MODELO DE BURGER

La cuantificación del comportamiento de Creep en materiales alimenticios sólidos ha sido tradicionalmente basada en modelos viscoelásticos lineales principalmente del tipo generalizado Kelvin-Voigt o modelo de Burger con un discreto número de elementos, en todos los casos es de la forma general:

$$J(t) = K_0 + K_1 t + \sum_{i=2}^N K_i (1 - e^{-t/T_i}) \quad (2c)$$

Donde $J(t)$ es el compliance (deformación por unidad de área relativa al esfuerzo). Las K 's son constantes y las T_i 's son tiempos de retardo o tiempos característicos.

Otra forma de representar el modelo de Burger es:

$$J(t) = J_0 + J_1 (1 - e^{-t/T_1}) + t/\eta_0 \quad (3c)$$

que corresponde al modelo mecánico mostrado en la Figura No. 1.13.

Comparando las ecuaciones 2c y 3c es evidente que ambas son equivalentes tomando en cuenta que:

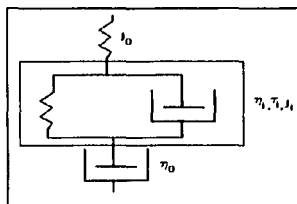
$$K_1 t = \dot{\eta}_0 \quad (4c)$$

$$J_0 = K_0 \quad (5c)$$

$$\text{y } J_1 = K_1 \quad (6c)$$

Este modelo describe mejor que el líquido de Maxwell y el sólido de Kelvin a muchos de los materiales reales entre los que podemos encontrar a los alimentos. El Modelo de Burger resulta del acoplamiento en serie de un modelo de Kelvin con un pistón y un resorte (Figura No. 1.12). El esfuerzo que recibe el sistema es el mismo que recibe cada uno de los elementos y la deformación total es la suma de las deformaciones de los elementos: pistón, resorte y elemento Kelvin.

Figura No. 1.12
MODELO MECÁNICO DE BURGER

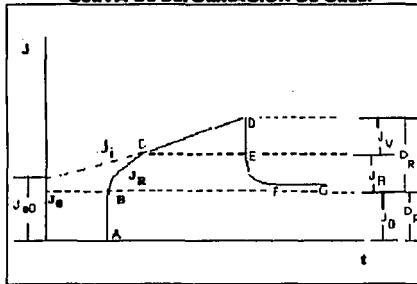


donde:

$$\eta_i = \frac{T_i}{J_i} \quad (7c)$$

Al aplicar una deformación constante al modelo de Burger ocurre una deformación instantánea debida al elemento elástico (resorte) caracterizada por J_0 que corresponde a la sección AB de la Figura No. 1.13, en la cual los enlaces entre las diferentes unidades estructurales son estirados elásticamente. En esta región si el esfuerzo es retirado, la estructura de la muestra se recuperará completamente.

Figura No. 1.13
CURVA DE DEFORMACIÓN DE CREEP



Fuente: Rao y Steffe (1992)

Enseguida se presenta una deformación retardada debida al elemento Kelvin caracterizada por un J_i , un tiempo de retardo T_i y una viscosidad η_i , que corresponde a la sección BC de la gráfica. La región BC corresponde a la zona elástica retardada dependiente del tiempo con una deformación J_R . En esta región los enlaces se rompen y reforman, pero todos ellos no lo hacen a la misma velocidad.

El tiempo de retardo es el tiempo en el cual la deformación retardada alcanza el 63% de su valor final.

Finalmente se presenta una deformación puramente viscosa debida al elemento viscoso (pistón) caracterizada por una viscosidad η_0 que corresponde a la sección CD de la gráfica. La región CD es una zona lineal de deformación Newtoniana en la cual las unidades fluyen como resultado de una ruptura de enlaces.

La pendiente de esta sección es el inverso de viscosidad en esta zona, de manera que la velocidad de cizallamiento queda definida por el esfuerzo aplicado multiplicado por el inverso de la pendiente.

La viscosidad de la región CD se conoce como viscosidad a cero velocidad de cizallamiento (zero shear viscosity) y este parámetro es útil para predecir velocidades de sedimentación y para el cálculo del peso molecular de polímeros fundidos.

La intersección de la zona CD con el eje de las ordenadas en la curva de deformación proporciona la "deformación en estado estacionario", la cual representa la elasticidad introducida por el resorte del elemento elástico y del modelo de Kelvin.

$$J_{e_0} = \frac{\gamma_0}{\tau_c} \quad (8c)$$

donde:

τ_c es el esfuerzo aplicado

J_{e_0} es el valor de la porción de línea recta, en la curva de Creep extrapolada al tiempo cero. Un módulo de corte, G_r , puede definirse como el recíproco del compliance estacionario J_{e_0} .

$$G_r = \frac{\tau_c}{J_{e_0}} \quad (9c)$$

En el momento en que el esfuerzo es retirado, ocurre una recuperación instantánea debida al elemento elástico (zona DE), seguida de una recuperación retardada debida al elemento Kelvin (EF) y finalmente queda una deformación permanente (Dr) debida al elemento viscoso (FG). (Sherman, 1970)

Dado que los enlaces entre las unidades estructurales se rompieron en la región CD, una parte de la estructura no se recuperará. Para valores de tiempo después de que el esfuerzo se ha retirado, la deformación recuperada alcanza un valor máximo (D*), llamado corte recuperable.

1.9. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS DE UNA PRUEBA DE CREEP

Existen varias formas o métodos de para analizar los resultados de pruebas de Creep Uno de los métodos más usados en la industria de alimentos es el que se basa en el Modelo de Burger y en el método gráfico de Inokuchi, ya que describe con claridad todos los componentes de la curva de Creep sin embargo este método es un poco complicado y laborioso, es por esta razón que varios investigadores han desarrollado otros métodos de análisis algunos de ellos más sencillos tales como calcular el porcentaje de contribución de cada uno de los componentes de la curva de Creep a la deformación total, o usando modelos simplificados al modelo de Burger. Aunque los distintos métodos de análisis son basados en los mismos principios, los parámetros a calcular suelen ser diferentes o expresados de diferente manera, es por ello que la elección de cual de ellos se debe utilizar para el análisis de los resultados, depende en gran medida de que es lo que uno desea reportar, además de la rapidez con la que se desean hacer los cálculos. En el programa CREEP se podrá hacer uso de los tres métodos que en esta tesis se estudian con

la finalidad de que puedan utilizarse con una mayor facilidad y rapidez y que el usuario pueda comparar los resultados entre sí.

A continuación se describen cada uno de los métodos.

1.9.1. MÉTODO I: CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE BURGER USANDO EL MÉTODO GRÁFICO DE INOKUCHI

La relación deformación esfuerzo $J(t)$ a cualquier tiempo está definida como:

$$J(t) = J_0 + J_R + J_N \quad (10c)$$

A tiempos muy cortos, solamente J_0 contribuye a $J(t)$, pero a tiempos más prolongados los tres términos del lado derecho de la ecuación contribuyen a $J(t)$.

Para obtener el valor de J_0 , basta con medir directamente la fase AB de la curva de la relación deformación esfuerzo contra el tiempo.

El módulo de elasticidad instantánea E_0 , lo obtenemos de la relación

$$J_0 = \frac{1}{E_0} \quad (11c)$$

La viscosidad Newtoniana (η_0) se obtiene de la pendiente de la parte lineal de la curva correspondiente a la región CD.

$$\eta_0 = \frac{1}{\text{pendiente}} \quad (12c)$$

J_{R0} lo podemos obtener de la ordenada al origen de la parte lineal de la curva de Creep.

La región BC que corresponde a la relación deformación esfuerzo retardada (J_R) es la más difícil de analizar, ya que abarca un amplio rango de respuestas debido a la deformación de enlaces de fuerzas diferentes. La zona BC de la curva de Creep puede ser descrita por:

$$J_R = \sum_i^n J_i \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} \right) \quad (13c)$$

$$J_R = J_i - J_i e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} \quad (14c)$$

Si se supone que existen t enlaces los cuales cada uno tiene su relación deformación/esfuerzo elástica (J_i) y un tiempo de retardo T_i tenemos que:

$$T_i = J_i \eta_i \quad (15c)$$

Donde η_i es la viscosidad asociada con la relación deformación/esfuerzo de retardo J_i .

Siguiendo el procedimiento gráfico de Inokuchi.

$$J_i - J_R = Q \quad (16c)$$

Donde Q es la diferencia entre el compliance obtenido de la extrapolación de la zona lineal de la curva de Creep (Zona CD) y los valores del compliance en la zona de retardo de la curva de Creep (Zona BC).

$$J_i - \left(J_i - J_i e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} \right) = Q \quad (17c)$$

$$J_i e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} = Q \quad (18c)$$

Usando las propiedades de los logaritmos se tiene que:

$$\ln J_i e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} = \ln Q \quad (19c)$$

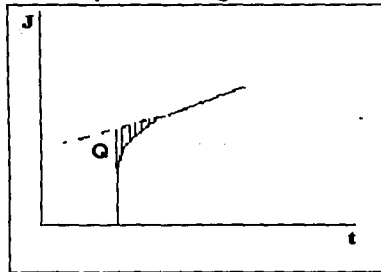
$$\ln J_i + \ln e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} = \ln Q \quad (20c)$$

$$\ln J_i + \frac{-t}{T_i} = \ln Q \quad (21c)$$

$$\ln Q = \frac{-1}{T_i}(t) + \ln J_i \quad (22c)$$

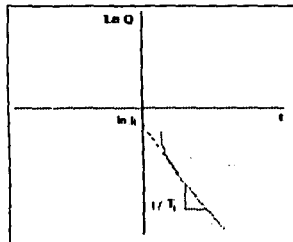
A cualquier tiempo t , Q representa la distancia vertical entre la extrapolación de la parte lineal CD de la curva relación deformación/esfuerzo con el tiempo y la región de relación deformación/esfuerzo BC.

Figura No. 1.14
Representación gráfica de Q



Grificando $\ln Q$ contra el tiempo.

Figura No. 1.15
 $\ln Q$ Vs tiempo



Cuando el gráfico de $\ln Q$ vs t es lineal sobre todos los valores de t entonces J_i y η_i describen adecuadamente la región de la relación deformación/esfuerzo de retardo, sin embargo cuando la gráfica se desvía de la linealidad a tiempos cortos se debe continuar con el análisis.

Entonces

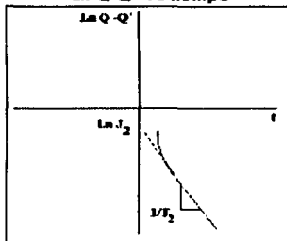
$$\eta_i = \frac{T_i}{J_i} \quad (23c)$$

Si se obtiene una línea recta sobre un rango amplio de tiempo pero no a valores cortos de tiempo, extrapolamos la parte lineal de este gráfico con el eje Y para obtener el valor de $\ln J_i$, mientras que la pendiente de la parte recta, representa $1/T_i$.

Ahora la contribución de la primera J_1 de la relación esfuerzo deformación de retardo es restada de Q y entonces se grafica:

$$\ln \left[Q - J_1 e^{\left(\frac{-t}{T_1} \right)} \right] \text{ vs } t = \ln Q - Q' \text{ vs } t \quad (24c)$$

Figura No. 1.16
Ln Q-Q' Vs Tiempo



Este gráfico también es lineal para valores prolongados de tiempo, los valores de J y T son derivados de la parte extrapolada de la región lineal de la misma manera que J_1 y T_1 . Si la gráfica aún se aleja de la linealidad a valores cortos de tiempo se debe graficar

$$\ln \left[Q - J_1 e^{\left(\frac{-t}{T_1} \right)} - J_2 e^{\left(\frac{-t}{T_2} \right)} \right] \text{ vs } t = \ln [Q - Q'] \text{ vs } t \quad (25c)$$

Y así sucesivamente hasta que los valores derivados de J_1, J_2, \dots, J_n y $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ son suficientes en número para describir la región BC.

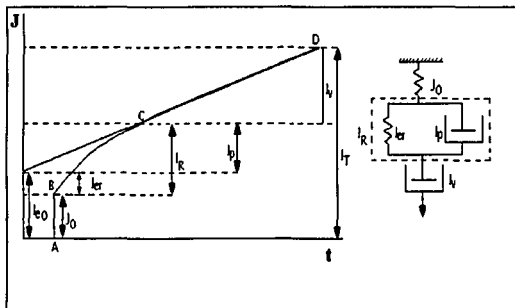
Una vez que se han calculado todos los parámetros que contribuyen a la deformación en la zona de retardo, (J_R), la zona puramente viscosa (J_V) y elástica instantánea (J_0), todos estos parámetros se sustituyen en la ecuación (3c) con lo que se obtiene la ecuación que representa la relación esfuerzo deformación (compliance) en una prueba de fluencia para una muestra dada. (Purkayastha; Peleg; Jhonson y Normand, 1985)

1.9.2. MÉTODO II: CALCULO DEL PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CASRO DE LOS COMPONENTES DE LA CURVA DE CREEP

El primer paso para calcular el porcentaje de la contribución de cada uno de los componentes en la curva de Creep es trazar la curva de tiempo Vs J usando los datos obtenidos en la prueba de Creep.

Posteriormente se procede a identificar cada uno de los componentes en la curva y relacionarlos con el modelo mecánico, tal como se muestra en la Figura No. 1.17, la cual muestra esquemáticamente los componentes de la deformación en la curva de Creep y en el modelo de Burger.

Figura No. 1.17
COMPONENTES DE LA DEFORMACIÓN
EN LA CURVA DE CREEP Y EL MODELO DE BURGER



Una vez identificados dichos componentes, se procede a obtener la contribución de cada uno de los mismos a la deformación total midiendo ésta en el eje de las ordenadas de la curva de Creep y calculando la deformación tal como se indica a continuación.

J_0 : Corresponde a la Deformación Elástica Instantánea, es representado en el modelo de Burger mediante un resorte y en la curva de Creep está representado por el primer punto de la curva que corresponde a la sección AB también llamada **Zona Elástica Instantánea**

J_{ve} : Corresponde a la suma de la deformación elástica del elemento Kelvin (J_k) y la deformación elástica instantánea (J_0).

$$J_{e0} = J_0 + J_{er} \quad (1d)$$

Para encontrar el valor de J_{e0} gráficamente es necesario extrapolar la sección puramente viscosa de la curva de Creep (CD) hasta que esta intercepte con el eje de las ordenadas; el valor de la intersección corresponde al valor de J_{e0} que estamos buscando.

J_{er} : Deformación Elástica del Elemento Kelvin, es representado en el modelo de Burger como un resorte que se encuentra localizado dentro del elemento Kelvin, el cual está conectado en serie con el elemento elástico instantáneo (J_0); Para encontrar el valor de J_{er} gráficamente, es necesario restar al valor de J_{e0} el valor de la deformación elástica instantánea (J_0).

J_p : Deformación Viscosa del Elemento Kelvin, Se representa en el modelo de Burger mediante un pistón el cual se encuentra conectado en paralelo con el elemento elástico (resorte) dentro del elemento Kelvin. Para obtener gráficamente el valor de J_p , es necesario restar del punto C de la curva de creep (que corresponde al punto donde termina sección de la deformación retardada y comienza la sección de la deformación viscosa) el valor de J_{e0} .

J_R : Deformación Retardada es la contribución total del elemento elástico del elemento Kelvin (J_{er}) representado por el resorte y el elemento viscoso del elemento Kelvin (J_p) representado por un pistón. En la curva de Creep, su valor lo podemos obtener gráficamente sumando el valor de J_{e0} al valor de J_p .

$$J_R = J_{er} + J_p \quad (2d)$$

J_v : Deformación Puramente Viscosa, representada en el modelo de Burger por un pistón conectado en serie con el elemento Kelvin. El valor de J_v se puede obtener gráficamente con la diferencia entre el último punto de la sección viscosa de la curva de Creep (D) y el primer punto de la misma (C).

J_T : Deformación Total de la curva de Creep, se calcula con la suma de la Deformación Elástica (J_0), la deformación Retardada (J_R) y la Deformación Puramente Viscosa (J_v).

$$J_T = J_0 + J_R + J_v \quad (3d)$$

Una vez calculado el valor de cada una de las contribuciones de las deformaciones anteriormente mencionadas, podemos también calcular el porcentaje de cada una de las contribuciones en función de la deformación total (J_T).

Nótese que este método no calcula los valores del(los) tiempo(s) de retardo ni tampoco ninguno de los parámetros tales como la viscosidad newtoniana (η_N) o J_1 , si es necesario conocer los parámetros se debe recurrir al método I (Cálculo de los parámetros del

modelo de Burger usando el Método gráfico de Inokuchi). El método II nos es útil cuando deseamos conocer de manera general como contribuye cada uno de los elementos del modelo mecánico a la deformación total. (Purkayastha; Peleg; Jhonson y Normand, 1985)

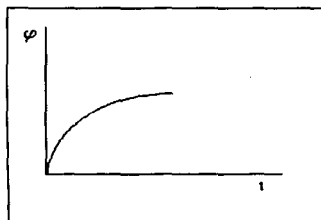
1.10. MÉTODO III: CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP MEDIANTE EL USO DEL MODELO SIMPLIFICADO DE BURGER (FUNCIÓN CREEP)

Como fue previamente demostrado por Purkayastha y colaboradores (1985), existen algunas expresiones matemáticas igualmente efectivas para describir las curvas de Creep, las más simples son relaciones puramente empíricas que contienen dos o más constantes. En algunas de ellas debido al limitado número de constantes, es difícil relacionar separadamente los diferentes componentes del fenómeno Creep: el compliance instantáneo (K_0 o J_0), el estado de flujo constante ($K_1 t$ o t/η_1) o su ausencia y los efectos viscoelásticos transitorios como se expresan en la función Creep $\varphi(t)$, si en la ecuación (7c) se omiten los términos correspondientes al Compliance instantáneo J_0 y el de flujo constante J_1 , se obtiene la ecuación No. (1e), la cual se conoce con el nombre de **función Creep** $\varphi(t)$.

$$\varphi(t) = \sum_{i=2}^N K_i [1 - e^{-(t/\tau_i)}] \quad (1e)$$

Dicha función la podemos expresar gráficamente de la siguiente manera:

Figura No. 1.18
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA FUNCIÓN CREEP



Como ha sido mostrado previamente, esta función Creep conteniendo de dos a cuatro términos exponenciales, podía ser descrita por una ecuación de dos constantes de la forma:

$$\varphi(t) = \frac{t}{K_2 + K_3 t} \quad (2e)$$

La cual puede ser expresada en su forma lineal como:

$${}^t \varphi(t) = K_2' + K_3' t \quad (3e)$$

Donde K_2' y K_3' son constantes. En consecuencia la curva de Creep (de una variedad de alimentos y materiales) podrá ser descrita por la forma simplificada.

$$J(t) = K_0' + K_1' t + \frac{t}{K_2' + K_3' t} \quad (4e)$$

La cual mantiene las características generales del modelo generalizado Kelvin-Voigt expresado en la ecuación (10c). Como se ha mencionado, la viscoelasticidad no lineal se manifiesta por una dependencia con el esfuerzo de las constantes de Creep, la aplicación de la ecuación (4e) a los datos de pruebas de Creep puede facilitar el análisis de la no-linealidad en cada una de las curvas de Creep.

S. Purkayastha y colaboradores (1985) realizaron una caracterización del comportamiento de Creep en pruebas de compresión para queso Cheddar y muestras de papa fresca, los resultados obtenidos fueron analizados usando el Modelo de Kelvin-Voigt en el modelo de Burger con 4 o 6 constantes y el modelo simplificado de 4 parámetros del tipo de la ecuación (4e) o función Creep como se le ha llamado en este trabajo.

Las curvas obtenidas fueron trazadas con y sin el uso de una corrección del esfuerzo debida a la expansión del área de sección transversal. La magnitud de las constantes del modelo simplificado fue un indicativo del carácter reológico general del material y la dependencia con el esfuerzo del comportamiento viscoelástico no lineal. Una de las conclusiones más importantes en el trabajo presentado por Purkayastha y sus colaboradores son las siguientes:

La gráfica de curvas de Creep individuales ya sea corregidas por efectos dimensionales o no pueden ser satisfactoriamente descritas por más de un tipo de modelo matemático. Es también mostrado que las características reológicas generales de los materiales son claramente expresados en la magnitud de las constantes que conforman las diferentes secciones de la deformación pero en menor grado en la gráfica de la función Creep.

El primer paso es el cálculo de los valores de J para cada valor de tiempo. Una vez que se tienen los valores de J , se procede a trazar la curva de Creep (t vs J).

Se obtiene el valor de J_0 el cual es representado por el primer punto de la curva.

Posteriormente se procede a buscar el punto de la gráfica en el cual la curva se convierte en una línea recta (punto C de la curva de Creep Figura No. 1.13).

Una vez encontrada la sección de la curva que corresponde a la deformación puramente viscosa (CD) se procede a calcular los parámetros involucrados en esta sección tal y como se hace en el Método I (regresión lineal).

Ahora solamente resta calcular la zona de retardo (BC) de la curva de Creep, esto se hace con el uso de la función Creep $\varphi(t)$ de la siguiente manera.

Si suponemos que la función Creep $\varphi(t)$ representa a la zona de retardo.

$$\varphi(t) = \frac{t}{K_2 + K_3 t} = \sum J_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (1)$$

Como se mencionó anteriormente esta ecuación puede ser representada gráficamente tal como lo muestra la Figura No. 1.19.

De la ecuación (4e) se despeja la función Creep $\frac{t}{K_2 + K_3 t}$ quedando:

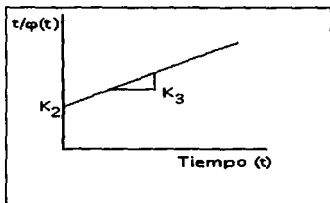
$$\varphi(t) = J(t) - K_0 + K_1 t = \frac{t}{K_2 + K_3 t}$$

El siguiente paso es linealizar la ecuación anterior pasando el término del tiempo al primer miembro de la ecuación y colocándola de manera inversa lo cual resulta:

$$\frac{t}{\varphi(t)} = K_2 + K_3 t \quad (2)$$

Como podemos observar, esta ecuación tiene la forma general de la ecuación de la línea recta la cual podemos expresar gráficamente de la forma:

Figura No. 1.19
GRÁFICA LINEALIZADA DE LA FUNCIÓN CREEP



Para encontrar los valores de K_2 y K_3 dividimos el valor del tiempo entre cada valor de $\varphi(t)$ correspondiente a este tiempo en la sección BC de la curva de Creep posteriormente, es graficada contra el tiempo, de esta gráfica se obtiene el valor de la constante K_2 el cual corresponde a la ordenada y el valor de la constante K_3 representada por la pendiente de la recta. Una vez calculadas los valores de las dos constantes, procedemos a sustituirlos en la ecuación. (1f) y esta a su vez la sustituimos en la siguiente ecuación

$$J(t) = J_0 + \frac{t}{\eta_N} + \frac{t}{K_2 + K_3 t} \quad (3f)$$

donde $K_0 = J_0$ y $K_1 = 1/\eta_N$

Comparando la ecuación (3f) con la ecuación (3c), puede notarse que ambas tienen la misma forma, por lo tanto son equivalentes.

Una vez que se han encontrado los valores de las constantes K_0 , K_1 , K_2 y K_3 , estas son sustituidas en la ecuación (3f) para cada valor de tiempo, con lo que se obtienen la serie de datos de tiempo vs J calculada serie que puede ser comparada contra los valores de J experimental de la misma manera que en el método I, mediante dicha comparación puede observarse cual de los modelos describe mejor el comportamiento reológico de la muestra analizada. (Purkayastha; Peleg; Jhonson y Normand, 1985)

1.11. REQUERIMIENTOS PARA LA PRUEBA ESTÁTICA DE CREEP

Cuando se efectúa una prueba de Creep compliance es necesario que las mediciones de viscoelasticidad reúnan los siguientes requisitos.

El esfuerzo y la deformación deben ser lo más pequeñas posible, de manera que la prueba sea del tipo no destructiva.

Condiciones de viscoelasticidad lineal, de no ser así debe indicarse que no se trabajó en la zona lineal.

La prueba debe efectuarse a volumen constante.

La relación esfuerzo-deformación de un material viscoelástico ideal depende de la constante de deformación y porcentaje de deformación, sin embargo, es independiente de las dimensiones específicas del material. Pero, si el mismo material tiene diferentes dimensiones (longitud, diámetro, espesor, etc.) su porcentaje de deformación no será el mismo.

En los alimentos, especialmente en los que la deformación ocurre en un mismo plano, que es el caso de los métodos de evaluación de textura, experimentan cambios del área de la sección transversal y cambios de forma. Sin embargo, la tendencia de la desviación de un comportamiento elástico ideal o de un comportamiento viscoelástico, es válido en rangos de deformación pequeños. Esto implica que el papel de las dimensiones iniciales puede ser un aspecto decisivo, cuando se involucran deformaciones grandes en las pruebas de compresión en alimentos.

1.12. ALGUNAS APLICACIONES DE LAS PRUEBAS DE FLUENCIA EN ALIMENTOS

Algunos investigadores como Konstance R. P. y Holsinger V. H. (1992) han realizado algunos trabajos de análisis reológicos de productos lácteos tales como queso con la finalidad de encontrar una relación entre estos análisis y su posible ayuda en la predicción de la calidad textural al mismo tiempo que se entiende la química de este alimento. Shoemaker F. Charles y colaboradores (1992) en su trabajo de caracterización reológica de productos lácteos, relacionan a las propiedades reológicas de estos productos con la textura, la estabilidad así como también la relación que presentan estas propiedades con el diseño de procesos.

Otra área de aplicación de las pruebas de Creep es en los geles de proteína debido a que las proteínas contribuyen al comportamiento funcional y calidad de muchos alimentos, los aislados de proteínas han sido usados en la fabricación de nuevos productos ricos en proteína. Sin embargo, muchas aplicaciones dependen de las propiedades de las proteínas incluyendo su poder gelificante como por ejemplo en las carnes procesadas. Una mejor definición y entendimiento de las características reológicas de geles de proteína es indispensable, tal como lo demuestran Kamata Y. y Kinsella J. E. (1989) en su trabajo "Comparación del fenómeno Creep en geles alimenticios de proteína" en el cual caracterizan reológicamente usando pruebas de Creep bajo compresión de dispersiones de gelatina, aislados de proteína de soya, y una mezcla de concentrado de proteína de suero y caseína a diferentes temperaturas. En este trabajo ellos encuentran la relación existente entre las propiedades reológicas del gel y la temperatura.

1.13. INSTRUMENTOS PARA PRUEBAS DE CREEP COMPLIANCE

A escala comercial existen instrumentos para la determinación de propiedades viscoelásticas bajo pruebas estáticas de Creep y relajación, ya sea por compresión o cizallamiento.

Uno de los equipos más utilizados para pruebas por compresión es el Instron Universal Testing Machine.

Generalmente en las pruebas de Creep por cizallamiento se utilizan reómetros que puedan manejar pruebas de flujo o pruebas de "Creep" y dinámicas, (PHYSICA, RHEOMAT, HAAKE).

El precio de estos instrumentos es inaccesible para muchos centros de investigación y docencia, por lo cual se han dado a la tarea de construir sus propios instrumentos para realizar pruebas de Creep por compresión.

Algunos de los reómetros realizan un análisis de datos usando el modelo de Burger, ya que este describe el comportamiento de algunos materiales alimenticios, sin embargo, el análisis no siempre es completo ya que solamente miden algunos de los parámetros como J_0 , J_e0 , η_0 , γ_0 , pero no analizan la zona de deformación retardada y para obtener un mejor análisis, es necesario hacerlo manualmente, lo que lo convierte en una tarea difícil y tediosa por la cantidad de cálculos que se tienen que realizar y la cantidad de datos que se tienen que manejar, aunque existe la posibilidad de usar una computadora con una hoja de cálculo como Excel o Lotus 123, y diseñar una hoja de trabajo específica esto también puede consumir un tiempo considerable, por esta razón se ha pensado en diseñar un programa que realice todos los cálculos necesarios, y presente gráficos para que el investigador solamente ingrese los datos, y obtenga fácilmente todos los parámetros reológicos sin necesidad de tener grandes conocimientos de computación, además de que el uso del programa ahorrará tiempo, el cual se puede invertir en un mayor tiempo de experimentación o en la interpretación de los resultados.

CAPITULO II DESARROLLO DE LOS PROGRAMAS DE COMPUTO

2.1. IMPORTANCIA DEL USO DE LAS COMPUTADORAS EN LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

En la actualidad el uso de la computadora es imprescindible en todas las actividades humanas, desde las actividades más sencillas tales como la cocina en el hogar, juegos para niños y adolescentes, o áreas científicas muy complejas como la exploración del espacio, o cualquier otra que nos podamos imaginar. La Ingeniería, la tecnología de alimentos y la computación, en la actualidad, van siempre de la mano, ya que sin el uso de las computadoras, estas dos áreas no tendrían el desarrollo con el que cuentan hoy en día, como ejemplos pueden citarse a la programación de la producción, automatización y control de procesos, análisis químicos con equipos computarizados, pruebas físicas con equipos computarizados tales como pruebas de color, propiedades reológicas y de textura, propiedades térmicas entre otras, En la administración de la calidad con el control de inventarios, compras, ventas, desarrollo y control de formulaciones, análisis de resultados, presentación de resultados. Con todas estas aplicaciones se reducen tiempos y costos, se ahorran recursos, se controlan las compras y ventas, se mejora la calidad se optimizan los procesos y se hace más rápido y mejor la investigación y desarrollo, todos factores determinantes en el mundo actual mecanizado y competitivo.

Los equipos de análisis más modernos pueden ser conectados a una computadora, la cual ayuda a que el análisis sea más rápido, controla factores como temperatura, presión, etc. además de realizar gran parte del análisis de resultados lo que reduce el trabajo del investigador o analista a la interpretación de los mismos, los cuales pueden ser apoyados por la presentación de gráficos que muchas veces la misma computadora presenta. Con la computadora podemos hacer uso de bases de datos, en las cuales podemos almacenar toda la información necesaria para optimizar nuestro trabajo tales como formulaciones, proveedores, análisis estadísticos, etc. en fin la computación en la Ingeniería y Tecnología de alimentos al igual que en cualquier actividad de nuestra vida diaria es una herramienta muy importante, su objetivo principal es reducir el trabajo e impulsar el desarrollo. Cabe señalar, que muchos de los programas que hoy en día acompañan a los diferentes equipos de análisis, no siempre presentan todos los parámetros que se desean conocer al realizar una prueba, tal es el caso de los instrumentos que realizan pruebas de Creep los cuales debido a que en la mayoría de los casos no son diseñados para el análisis de alimentos específicamente, los parámetros que reportan dichos programas no son suficientes para la interpretación de los resultados, Por

tal motivo se requiere en muchos casos diseñar programas computacionales más completos y especiales para el análisis de alimentos.

En el caso particular de las pruebas de propiedades reológicas y texturales en alimentos estas han cobrado relevante importancia tanto para el productor como para el consumidor, y el desarrollo de productos con propiedades características es fundamental y se puede lograr gracias al desarrollo de ingredientes y formulaciones adecuadas. La medición y control de estas propiedades se efectúa con instrumentos de diferentes tipos:

De control mecánico: Penetrómetros, Gelómetros

De control eléctrico: Viscosímetros.

De control computarizado: Reómetros y Viscosímetros.

En los tres casos se adquieren datos de deformación, esfuerzos y tiempos que posteriormente tienen que analizarse para obtener parámetros reológicos o texturales que describen el comportamiento mecánico del material.

En los dos primeros casos, se recurre al uso de las computadoras utilizando hojas de cálculo o programas matemáticos en los cuales, los datos obtenidos son analizados para obtener los parámetros reológicos y texturales. Esto proporciona un considerable ahorro de tiempo comprado con la ejecución de las operaciones utilizando calculadoras. Ejemplo de esto lo tenemos en:

- Cálculo de parámetros reológicos de fluidos a partir de datos obtenidos en viscosímetro Brookfield.
- Cálculo de parámetros reológicos para pruebas de Creep, con datos obtenidos en instrumentos que operan por compresión en ocasiones diseñados y construidos por el investigador.

Si bien, en estos casos las hojas de cálculo y programas matemáticos son de gran apoyo, resulta más útil el desarrollo de programas específicos para cada prueba.

Cuando se trata de equipos computarizados como los reómetros actuales, el software incluye opciones de análisis que tienen integrados los modelos reológicos más comunes.

En el caso particular de las pruebas de Creep, por lo menos dos marcas de reómetros (PHYSICA y HAAKE) no efectúan el cálculo de todos los parámetros reológicos de modelo de Burger al cual se ajustan muchos alimentos.

Estos cálculos pueden efectuarse, por el método gráfico de Inokuchi en una hoja de cálculo pero puede consumir cierto tiempo por lo que el diseño de un programa específico y amigable para este fin resulta en un ahorro considerable de tiempo.

Es por esta razón que se propuso este trabajo el cual consiste en desarrollar un programa para el análisis de datos de pruebas de textura (Dureza) realizadas en un penetrómetro Universal y otro programa que realice el análisis de datos de pruebas de Creep para el modelo de Burger en datos obtenidos en instrumentos de compresión o de cizallamiento (reómetros).

En este capítulo primeramente se describe de manera general la metodología que se debe seguir para el diseño de un programa para computadora y posteriormente, se lleva a cabo el desarrollo de cada uno de los programas siguiendo dicha metodología concluyendo el desarrollo de cada uno de los programas con la implementación de los mismos en el Laboratorio de Propiedades Reológicas y Funcionales en Alimentos de la Facultad de Estudios superiores Cuauhtitlán de la UNAM.

2.2. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE PROGRAMAS COMPUTACIONALES

Para el desarrollo de un programa de computo es necesario el seguir cierta metodología, la cual podemos resumir en los siguientes pasos:

1. Planteamiento del problema
2. Desarrollo del Algoritmo
3. Diseño del Diagrama de Flujo
4. Selección del lenguaje de programación
5. Codificación
6. Depuración
7. Prueba
8. Implementación. (López 1998)

A continuación se describe en que consiste cada uno de los pasos desarrollando simultáneamente el procedimiento para cada los programas TEXTURA y CREEP.

1. **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA** En este punto se debe describir claramente el enunciado del problema, si se trata de un problema en el cual se involucran operaciones matemáticas para su solución como por ejemplo en problemas de física, matemáticas o alguna área similar, se deben establecer todas las fórmulas así como las variables y constantes que intervienen en ellas.

Problema no. 1

Para el programa TEXTURA tomaremos como el enunciado el problema el Objetivo Específico No. 1 de este trabajo el cual dice:

"Desarrollar un programa computacional usando el lenguaje de programación TURBO PASCAL para disminuir el tiempo y facilitar el cálculo de dureza con distorsión de penetración obtenidos con un Penetrómetro Universal".

Problema no. 2

Para el caso del programa CREEP tomaremos como el enunciado el problema el Objetivo Específico No. 2 el cual dice:

"Desarrollar un programa computacional usando el lenguaje de programación TURBO PASCAL para disminuir el tiempo y facilitar el cálculo de los parámetros del modelo de Burger con 1 y 2 tiempos de retardo y el modelo de Burger simplificado a partir de datos de pruebas de Creep".

La descripción de formulas, las variables y constantes involucradas para el análisis de resultados, se presentan en el capítulo de Generalidades. Estas mismas fórmulas, variables y constantes, son las que se usarán en los programas.

2. DESARROLLO DEL ALGORITMO Un algoritmo lo podemos definir en pocas palabras como "el método o secuencia lógica de pasos para resolver un problema",

Un algoritmo describe la secuencia ordenada de pasos (sin ambigüedades) que conduce a la solución del problema planteado. El algoritmo debe ser independiente tanto del lenguaje de programación en el que se expresa como de la computadora que lo ejecuta. En esencia todo problema se puede describir por medio de un algoritmo.

A continuación se presenta la secuencia lógica de pasos que se deben seguir para la solución del problema no. 1.

Para una mejor comprensión del algoritmo se debe considerar lo siguiente:

Aunque los programas se efectuaron en un lenguaje de programación estructurado, en los algoritmos se han numerado cada una de los pasos para facilitar su seguimiento salvo en algunos procedimientos tales como decisiones y/o ciclos, los cuales se toman como un solo paso y los cuales se distinguen ya que siempre inician con la palabra INICIO y terminan con la palabra FIN.

En un solo número puede haber dos o más instrucciones.

- Solamente se colocan algunas de las variables que intervienen en el programa con la finalidad de entender la secuencia del programa, estas variables están escritas con letras cursivas.
- Los comentarios o mensajes que arroja el programa, se encuentran escritos con letras negritas y encerrados en un rectángulo con la finalidad de diferenciarlos de los pasos del algoritmo.
- Debido a que los procedimientos CONO1, CONO2, AGUJA y AGUJA2, son básicamente iguales y solamente difieren en las fórmulas empleadas, solamente se presenta el algoritmo para el procedimiento CONO1.
- En el algoritmo siguiente, las fórmulas que se presentan son mínimas, para las restantes solamente se hace referencia a éstas, pero no se presentan. Si se desea conocer cada una de las fórmulas, éstas son presentadas y explicadas en la página No. del capítulo de GENERALIDADES. Esto se hace con la finalidad de no complicar demasiado el algoritmo.

a) ALGORITMO DEL PROGRAMA TEXTURA

1. ALGORITMO PRINCIPAL

- 1.- INICIO
- 2.- DESPLEGAR PANTALLA DE PRESENTACIÓN
- 3.- DESPLEGAR MENÚ PRINCIPAL CON LAS SIGUIENTES OPCIONES

MENÚ PRINCIPAL	
a)	TRABAJAR CON CONO
b)	TRABAJAR CON AGUJA
c)	TERMINAR EL PROGRAMA

- 4.- PREGUNTA ¿OPCIÓN A ELEGIR? Y GUARDA LA RESPUESTA EN LA VARIABLE *OPCIÓN*
- 5.- EN CASO DE QUE LA VARIABLE *OPCIÓN* SEA IGUAL A "a" ENTONCES INICIA

DESPLIEGA EL MENÚ DE LA OPCIÓN CONO DE LA SIGUIENTE FORMA

MENÚ PARA TRABAJAR CON CONOS	
¿EN QUE RANGO SE ENCUENTRAN LAS LECTURAS TOMADAS?	
1)	ENTRE 0 Y 1.497 cm
2)	MAJOR DE 1.497 Y MENOR DE 4.947 cm
3)	SALIR DE LA OPCIÓN CONOS

- PREGUNTA ¿CUAL ES LA OPCIÓN A ELEGIR? Y GUARDAR LA RESPUESTA EN LA VARIABLE *RUN* EN CASO DE QUE LA VARIABLE *RUN* SEA IGUAL A:
 - "1" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **CONO1**
 - "2" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **CONO2**
 - "3" ENTONCES REGRESA AL PASO 3.

- FIN
"b" ENTONCES INICIA

DESPLIEGA EL MENÚ DE LA OPCIÓN AGUJA DE LA SIGUIENTE FORMA:

MENU DE LA OPCIÓN AGUJA --
¿EN QUE RANGO SE ENCUENTRAN LAS LECTURAS TOMADAS?

- 1) ENTRE 0 Y 0.497 cm
- 2) MAYOR DE 0.497 cm
- 3) SALIR DE LA OPCIÓN AGUJA

PREGUNTAR ¿CUAL ES LA OPCIÓN A ELEGIR? Y GUARDAR LA RESPUESTA EN LA VARIABLE *RUN*

EN CASO DE QUE LA VARIABLE *RUN* SEA IGUAL A:

- "1" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **AGUJA**
- "2" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **AGUJA2**
- "3" ENTONCES REGRESA AL PASO 3.

FIN

"c" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **FINDEPROGRAMA**

II. ALGORITMO PROCEDIMIENTO CONO1

- 1.- INICIO DEL PROCEDIMIENTO CONO1
- 2.- DESPLIEGA EL TÍTULO

SOLAMENTE ENTRA PARTE DEL CONO DE 18

3.- PREGUNTA EL NÚMERO DE EVENTOS O MEDICIONES Y GUARDA LA RESPUESTA EN LA VARIABLE *NE*

4.- CONVIERTE EL ANGULO DE 15° A RADIANES

5.- REPITE LOS SIGUIENTES PASOS DESDE QUE *A=1* HASTA QUE */SEA IGUAL A NE*

INICIO

PREGUNTA ¿LECTURA DE LA ESCALA? Y LA GUARDA EN LA VARIABLE *L//*

SI EL VALOR DE *L//* = 0 ENTONCES DESPLIEGA EL MENSAJE

"INGRESE UN VALOR MAYOR QUE CERO"

Y PREGUNTA NUEVAMENTE EL VALOR DE LA LECTURA

SI EL VALOR DE *L//* > 1.497 ENTONCES DESPLIEGA EL MENSAJE

"UTILICE LA OPCIÓN CORRESPONDIENTE AL CASO N EN EL MENÚ DE CONOS"

Y PREGUNTA NUEVAMENTE EL VALOR DE LA LECTURA, EN CASO CONTRARIO SIGUE AL PASO 6.

6.- PREGUNTA ¿SE UTILIZÓ PESO ADICIONAL?

7.- SI LA RESPUESTA ES AFIRMATIVA ENTONCES PREGUNTA

¿CUÁNTO FUE EL PESO ADICIONAL UTILIZADO (g)? Y/O GUARDA EN LA VARIABLE *PESOD*, EN CASO CONTRARIO

PESOD=0.

8.- PREGUNTAR ¿SE UTILIZÓ UN CONO DE ALUMINIO O UNO DE BRONCE?

9.- SI LA RESPUESTA FUE "ALUMINIO ENTONCES"

INICIO

ASIGNA A LA VARIABLE *PESODIS* EL VALOR DE 82.5

$PESOTOTAL = PESODIS + PESOD$

FIN

10.- SI LA RESPUESTA FUE "BRONCE ENTONCES"

INICIO

ASIGNA A LA VARIABLE *PESODIS* EL VALOR DE 149.5

$PESOTOTAL = PESODIS + PESOD$

FIN

11.- CALCULA EL VALOR DE *R1* PARA CADA LECTURA

12.- CALCULA EL VALOR DE *G1* PARA CADA LECTURA

13.- CALCULA EL VALOR DE *A1* PARA CADA LECTURA

14.- CALCULA EL VALOR DE *D* PARA CADA LECTURA

15.- CALCULA EL PROMEDIO DE LOS VALORES DE *R1*

16.- CALCULA EL PROMEDIO DE LOS VALORES DE *G1*

17.- CALCULA EL PROMEDIO DE LOS VALORES DE *A1*

18.- CALCULA EL PROMEDIO DE LOS VALORES DE *D*

19.- CALCULA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS VALORES DE *R1*

20.- CALCULA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS VALORES DE *G1*

21.- CALCULA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS VALORES DE *A1*

22.- CALCULA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS VALORES DE *D*

23.- CALCULA LA VARIANZA DE LOS VALORES DE *R1*

24.- CALCULA LA VARIANZA DE LOS VALORES DE *G1*

25.- CALCULA LA VARIANZA DE LOS VALORES DE *A1*

26.- CALCULA LA VARIANZA DE LOS VALORES DE *D*

27.- CALCULA EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS VALORES DE *R1*

28.- CALCULA EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS VALORES DE *G1*

29.- CALCULA EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS VALORES DE *A1*

30.- CALCULA EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS VALORES DE *D*

31.- DESPLIEGA LA TABLA DE RESULTADOS DE LA SIGUIENTE FORMA

**TABLA DE RESULTADOS
DISPOSITIVO DE PENETRACIÓN:**

ANGULO EN RADIANES:
NO. LECTURA R1 G1 A1 D

PROM.
VARIANZA
DESV. EST.
C.V.

32.- DESPLIEGA EL MENÚ RESULTADOS CON LAS SIGUIENTES OPCIONES

MENÚ RESULTADOS

- 1) IMPRIMIR LOS RESULTADOS
- 2) GUARDAR LOS RESULTADOS EN UN ARCHIVO
- 3) VER INSTRUCCIONES PARA LEER UN ARCHIVO DE DATOS
- 4) SALIR DEL MENÚ RESULTADOS

33.- PREGUNTA ¿CUÁL ES LA OCIÓN A ELEGIR? GUARDA LA RESPUESTA EN LA VARIABLE *MOTHER*

34.- EN CASO DE QUE LA VARIABLE *MOTHER* SEA IGUAL A

"1" ENTONCES IMPRIME LA TABLA DE RESULTADOS CON EL SIGUIENTE FORMATO

DISPOSITIVO DE PENETRACIÓN:

ANGULO EN RADIANES:
NO. LECTURA1 G1 A1 D

PROM.
VARIANZA
DESV. EST.
C.V.

"2" ENTONCES

INICIO

PREGUNTA ¿NOMBRE DEL ARCHIVO?

PREGUNTA ¿UNIDAD DE DISCO DONDE SE GUARDARA EL ARCHIVO?

PREGUNTA ¿SE DESEA AGREGAR INFORMACIÓN ADICIONAL?

SI LA RESPUESTA ES SI ENTONCES PREGUNTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

¿NOMBRE DEL USUARIO?

¿FECHA?

¿NOMBRE DE LA MUESTRA?

¿MARCA COMERCIAL?

¿PESO DE LA MUESTRA (g)?

¿DIMENSIONES DE LA MUESTRA?

ANCHO:

ALTO:

PROFUNDIDAD:

¿TIEMPO DE PENETRACIÓN (seg.)?

¿TEMPERATURA DE LA MUESTRA (°C)?

¿NOTAS ADICIONALES?

FIN

GRABA EL ARCHIVO DE DATOS EN LA UNIDAD SELECCIONADA USANDO EL SIGUIENTE FORMATO:

DISPOSITIVO DE PENETRACIÓN:

NUMERO DE EVENTOS

MATERIAL DEL DISPOSITIVO DE PENETRACIÓN

PESO DEL DISPOSITIVO

PESO ADICIONAL

PESO TOTAL

ANGULO EN RADIANES:

NO. LECTURA1 G1 A1 D

PROM.
VARIANZA
DESV. EST.
C.V.
NOMBRE DEL USUARIO
FECHA

NOMBRE DE LA MUESTRA
MARCA COMERCIAL
PESO DE LA MUESTRA (g)
DIMENSIONES DE LA MUESTRA
ANCHO
ALTO
PROFUNDIDAD
TIEMPO DE PENETRACIÓN (seg.)
TEMPERATURA DE LA MUESTRA (°C)
NOTAS ADICIONALES

REGRESA AL MENÚ RESULTADOS

"3" ENTONCES DESPLIEGA LAS INSTRUCCIONES PARA LEER EL ARCHIVO DE DATOS DESDE UNA HOJA DE CÁLCULO.

"4" REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

35.- FIN DEL PROCEDIMIENTO CONO1

A continuación se presenta la secuencia lógica de pasos que se deben seguir para la solución del problema no. 2.

Cabe señalar que el programa está diseñado para analizar los datos de las pruebas de Creep por los siguientes métodos.

- 1.- Cálculo de los parámetros del modelo de Burger con 1 y 2 elementos Kelvin siguiendo el método gráfico de Inokuchi.
- 2.- Cálculo de la contribución de cada uno de los elementos del modelo de Burger a la deformación total en la curva de Creep.
- 3.- Cálculo de las constantes del modelo de Burger simplificado utilizando la Función Creep.

b) ALGORITMO DEL PROGRAMA CREEP.

I. ALGORITMO PRINCIPAL

INICIO

MUESTRA PANTALLA DE PRESENTACIÓN

MUESTRA MENÚ PRINCIPAL

PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE PRUEBAS DE CREEP **MENÚ PRINCIPAL** **ENTRADA DE DATOS**

- 1) LEER DATOS DESDE UN ARCHIVO**
- 2) LEER DATOS DESDE TECLADO**
- 3) CORREGIR DATOS DE ARCHIVO**
- 4) SALIR DEL PROGRAMA**

PREGUNTA "¿OPCIÓN A ELEGIR ?"

SI RESPUESTA = 1 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **DISCO**

SI RESPUESTA = 2 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **TECLADO**

SI RESPUESTA = 3 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **CORREGIR**

SI RESPUESTA = 4 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **FIN DE PROGRAMA**

FIN

PROCEDIMIENTO **DISCO**

INICIO

MUESTRA MENÚ TIPO DE ARCHIVO

AQUI SE LIBERÁN LOS DATOS DESDE ARCHIVO

DESEA TRATAR LOS DATOS DE :

- A) TIEMPO vs ALTURA FINAL**
- B) TIEMPO vs GAMA**
- C) TIEMPO vs J**
- R) REGRESAR AL MENÚ PRINCIPAL**
- X) SALIR DEL PROGRAMA**

PREGUNTA "¿RESPUESTA ?"

SI RESPUESTA ="A" ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **DISCO1**

SI RESPUESTA ="B" ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **DISCO2**

SI RESPUESTA ="C" ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **DISCO3**

SI RESPUESTA ="R" ENTONCES VE A MENÚ PRINCIPAL

SI RESPUESTA ="X" ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **FIN DE PROGRAMA**

FIN

PROCEDIMIENTO TECLADO

INICIO

PRESENTA MENÚ ENTRADA DE DATOS DESDE TECLADO

MENÚ ENTRADA DE DATOS DESDE TECLADO

DESEA TRATAR LOS DATOS DE :

- F) TIEMPO vs ALTURA FINAL**
- G) TIEMPO vs GAMA**
- R) REGRESAR AL MENÚ PRINCIPAL**
- X) SALIR DEL PROGRAMA**

PREGUNTA "¿RESPUESTA ?"

SI RESPUESTA ="F" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TECLADO1**

SI RESPUESTA ="G" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TECLADO2**

SI RESPUESTA ="R" ENTONCES REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

SI RESPUESTA ="X" ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **FIN DE PROGRAMA**

FIN

PROCEDIMIENTO DISCO1

INICIO

INGRESE LA UBICACIÓN Y EL NOMBRE DEL ARCHIVO

LEE EL ARCHIVO DEL DISCO

MUESTRA LOS DATOS CONTENIDOS EN EL ARCHIVO

CALCULO DE GAMA

CALCULO DE J

MUESTRA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS GAMA Y J

PREGUNTAR SI DESEA GRABAR UN ARCHIVO DE TIEMPO VS J

SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **GRABAR**

SI LA RESPUESTA ES NO, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TRATAMIENTO DE DATOS**

FIN

PROCEDIMIENTO DISCO2

INICIO

INGRESE LA UBICACIÓN Y EL NOMBRE DEL ARCHIVO

LEE EL ARCHIVO DEL DISCO

MUESTRA LOS DATOS CONTENIDOS EN EL ARCHIVO

CALCULO DE J

MUESTRA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS GAMA Y J

PREGUNTAR SI DESEA GRABAR UN ARCHIVO DE TIEMPO VS J

SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **GRABAR**

SI LA RESPUESTA ES NO, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TRATAMIENTO DE DATOS**

FIN

PROCEDIMIENTO DISCO3

INICIO

INGRESE LA UBICACIÓN Y EL NOMBRE DEL ARCHIVO

LEE EL ARCHIVO DEL DISCO

MUESTRA TABLA DE TIEMPO VS J
VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TRATAMIENTO DE DATOS**
FIN

PROCEDIMIENTO TECLADO1

INICIO
PREGUNTA EL NÚMERO DE DATOS A INGRESAR
PREGUNTA EL VALOR DE LA FUERZA
PREGUNTA EL VALOR DEL ÁREA
PREGUNTA EL VALOR DE LA ALTURA INICIAL
PREGUNTA EL VALOR DEL TIEMPO
PREGUNTA EL VALOR DE LA ALTURA PARA CADA TIEMPO
PRESENTA LA TABLA DE LOS VALORES INGRESADOS
PREGUNTA SI SE DESEA CORREGIR ALGÚN DATO
SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **CORREGIR**
SI LA RESPUESTA ES NO, PREGUNTA SI SE DESEA GRABAR EL ARCHIVO DE DATOS
SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **GRABAR**
SI LA RESPUESTA ES NO, ENTONCES
REALIZA EL CÁLCULO DE GAMA
REALIZA EL CÁLCULO DE J
MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS GAMA Y J
PREGUNTA SI SE DESEA GRABAR EL ARCHIVO DE T VS J
SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **GRABAR**
SI LA RESPUESTA ES NO, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TRATAMIENTO DE DATOS**
FIN

PROCEDIMIENTO TECLADO2

INICIO
PREGUNTA EL NÚMERO DE DATOS A INGRESAR
PREGUNTA EL VALOR DE LA FUERZA
PREGUNTA EL VALOR DEL ÁREA
PREGUNTA EL VALOR DEL TIEMPO
PREGUNTA EL VALOR DE GAMA PARA CADA TIEMPO
PRESENTA LA TABLA DE LOS VALORES INGRESADOS
PREGUNTA SI SE DESEA CORREGIR ALGÚN DATO
SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **CORREGIR**
SI LA RESPUESTA ES NO, PREGUNTA SI SE DESEA GRABAR EL ARCHIVO DE DATOS
SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **GRABAR**
SI LA RESPUESTA ES NO, ENTONCES
REALIZA EL CÁLCULO DE J
MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS GAMA Y J
PREGUNTA SI SE DESEA GRABAR EL ARCHIVO DE T VS J
SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **GRABAR**
SI LA RESPUESTA ES NO, ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TRATAMIENTO DE DATOS**
FIN

PROCEDIMIENTO CORREGIR

INICIO
PRESENTA MENÚ CORREGIR ARCHIVOS DE DATOS

MENÚ CORREGIR ARCHIVO DE DATOS
1) ARCHIVO DE TIEMPO VS ALTURAS
2) ARCHIVO DE TIEMPO VS GAMA
3) ARCHIVO DE TIEMPO VS J

PREGUNTAR "¿OPCIÓN A ELEGIR ?"

SI LA RESPUESTA = 1 ENTONCES

INICIO

PREGUNTA LA UBICACIÓN Y NOMBRE DEL ARCHIVO

PRESENTA TABLA DE DATOS QUE CONTIENE EL ARCHIVO

PRESENTA EL SIGUIENTE MENÚ

EN DONDE SE ENCUENTRA EL ERROR ?

- A) TIEMPO O ALTURA FINAL**
- B) ALTURA INICIAL**
- C) FUERZA**
- D) ÁREA**
- E) NO CORREGIR NINGÚN DATO**

PREGUNTA "¿OPCIÓN?"

SI LA OPCIÓN = "A" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DE TIEMPO DONDE SE ENCUENTRA EL ERROR Y PREGUNTA EL VALOR DE LA ALTURA CORRESPONDIENTE A ESE TIEMPO

SI LA OPCIÓN = "B" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DE LA ALTURA INICIAL

SI LA OPCIÓN = "C" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DE LA FUERZA

SI LA OPCIÓN = "D" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DEL ÁREA

SI LA OPCIÓN = "E" ENTONCES REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

PREGUNTAR SI DESEA GRABAR SU ARCHIVO

SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES

INICIO

PREGUNTA LA UBICACIÓN Y EL NOMBRE DEL ARCHIVO

GRABA EL ARCHIVO

FIN

REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

FIN

SI LA RESPUESTA = 2 ENTONCES

INICIO

PREGUNTA LA UBICACIÓN Y NOMBRE DEL ARCHIVO

PRESENTA TABLA DE DATOS QUE CONTIENE EL ARCHIVO

PRESENTA EL SIGUIENTE MENÚ

EN DONDE SE ENCUENTRA EL ERROR?

A) TIEMPO OGAMA

B) FUERZA

C) ÁREA

E) NO CORREGIR NINGÚN DATO

PREGUNTA "¿OPCIÓN?"

SI LA OPCIÓN = "A" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DE TIEMPO DONDE SE ENCUENTRA EL ERROR Y EL VALOR DE GAMMA CORRESPONDIENTE A ESE TIEMPO

SI LA OPCIÓN = "B" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DE LA FUERZA

SI LA OPCIÓN = "C" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DEL ÁREA

SI LA OPCIÓN = "E" ENTONCES REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

PREGUNTAR SI DESEA GRABAR SU ARCHIVO

SI LA RESPUESTA ES SI, ENTONCES

INICIO

PREGUNTA LA UBICACIÓN Y EL NOMBRE DEL ARCHIVO

GRABA EL ARCHIVO

FIN

REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

FIN

SI LA RESPUESTA = 3 ENTONCES

INICIO

PREGUNTA LA UBICACIÓN Y NOMBRE DEL ARCHIVO

PRESENTA TABLA DE DATOS QUE CONTIENE EL ARCHIVO

PRESENTA EL SIGUIENTE MENÚ

EN DONDE SE ENCUENTRA EL ERROR ?

A) TIEMPO O J

B) NO CORREGIR NINGÚN DATO

PREGUNTA "¿OPCIÓN?"

SI LA OPCIÓN = "A" ENTONCES PREGUNTA EL VALOR DE TIEMPO DONDE SE ENCUENTRA EL ERROR Y EL VALOR DE J CORRESPONDIENTE A ESE TIEMPO

SI LA OPCIÓN = "B" ENTONCES REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

PREGUNTAR SI DESEA GRABAR SU ARCHIVO

SI LA RESPUESTA ES SI ENTONCES

INICIO

PREGUNTA LA UBICACIÓN Y EL NOMBRE DEL ARCHIVO

GRABA EL ARCHIVO

FIN

REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL
FIN
FIN

PROCEDIMIENTO **TRATAMIENTO DE DATOS**
INICIO
PRESENTA MENÚ TRATAMIENTO DE DATOS

MENÚ TRATAMIENTO DE DATOS

- 1) **CONTRIBUCIÓN DE CADA ELEMENTO A LA DEFORMACIÓN TOTAL**
- 2) **OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO DE BURGER**
- 3) **FUNCIÓN CREEP**
- 4) **REGRESAR AL MENÚ PRINCIPAL**
- 5) **SALIR DEL PROGRAMA**

PREGUNTAR "¿QUE MÉTODO DESEA USAR ?"
SI RESPUESTA = 1 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **CONTRIBUCIÓN**
SI RESPUESTA = 2 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **BURGER**
SI RESPUESTA = 3 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **CREEP**
SI RESPUESTA = 4 ENTONCES REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL
SI RESPUESTA = 5 ENTONCES VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **FIN DE PROGRAMA**
FIN

PROCEDIMIENTO **CONTRIBUCIÓN**
INICIO

VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **PRIMEROS PASOS**
REALIZA EL CÁLCULO DEL VALOR DE J DE CADA ELEMENTO DEL MODELO DE BURGER Y SU PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN A LA DEFORMACIÓN TOTAL
JT, Jo, Jeo, Jv, Jp, Jr Y Jer
MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS

TABLA DE RESULTADOS

PUNTO QUE ELIJO PARA INICIAR LA REGRESIÓN LINEAL :
VALOR DE TIEMPO EN ESE PUNTO :
VALOR DE J EN ESE PUNTO :

SEGMENTO VALOR PORCENTAJE

JT
Jo
Jeo
Jv
Jp
Jr
Jer

VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **MENÚ FINAL**
FIN

PROCEDIMIENTO **BURGER**
INICIO

VE AL PROCEDIMIENTO **PRIMEROS PASOS**
REALIZA EL CÁLCULO DE Q
REALIZA EL CÁLCULO DE $\ln Q$
PRESENTA LA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO, J LINEAL, J , Q Y $\ln Q$
MUESTRA EL GRÁFICO DE TIEMPO VS $\ln Q$
PREGUNTA SI SE DESEA EVALUAR LA MUESTRA CON 1 O 2 TIEMPOS DE RETARDO
SI LA RESPUESTA =1 ENTONCES

INICIO
REALIZA EL CÁLCULO DE J_1
REALIZA EL CÁLCULO DE ΔT_1
MUESTRA UNA TABLA DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE LA ZONA DE RETARDO
CALCULA J calculada
CALCULA $J - J$ calculada
CALCULA EL PORCENTAJE DE DIFERENCIA ENTRE J Y J CALCULADA
MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS J , J calculada., DIFERENCIA Y PORCENTAJE.
VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **MENÚ FINAL**
FIN
SI LA RESPUESTA =2 ENTONCES

INICIO

PREGUNTAR EN QUE PUNTO EL GRAFICO DE T VS LN Q SE CONVIERTE EN LINEA RECTA

REALIZA EL CALCULO DE J1

REALIZA EL CALCULO DE T1

MUESTRA UNA TABLA DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DEL TIEMPO DE RETARDO 1

CALCULA LN Q calculada PARA LOS PUNTOS QUE ESTÁN FUERA DE LA LINEA RECTA

REALIZA EL CALCULO DE Q calculada

REALIZA EL CALCULO DE Q - Q calculada

REALIZA EL CALCULO DE LN Q - Q calculada

REALIZA EL CALCULO DE J2

REALIZA EL CALCULO DE T2

MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS PARA EL TIEMPO DE RETARDO 2

REALIZA EL CALCULO DE J calculada

REALIZA EL CALCULO DE J - J calculada

REALIZA EL CALCULO DEL PORCENTAJE DE DIFERENCIA

MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS J, J calculada., DIFERENCIA Y PORCENTAJE.

VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **MENÚ FINAL**

FIN

FIN

PROCEDIMIENTO **CREEP**

INICIO

VE A PROCEDIMIENTO LLAMADO **PRIMEROS PASOS**

REALIZA EL CALCULO DE K0', K1', K2', K3'

PRESENTA TABLA DE RESULTADOS CON LOS VALORES DE K0', K1', K2', K3'

CALCULA J calculada

CALCULA J - J calculada

CALCULA EL PORCENTAJE DE DIFERENCIA

MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS J, J calculada., DIFERENCIA Y PORCENTAJE.

VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **MENÚ FINAL**

FIN

PROCEDIMIENTO **PRIMEROS PASOS**

INICIO

PRESENTA EL GRAFICO DE TIEMPO VS J

PREGUNTA EL PUNTO DE INICIO DE LA ZONA LINEAL DE LA CURVA DE CREEP

REALIZA LOS CÁLCULOS PARA LA ZONA VISCOSA

MUESTRA LA TABLA DE RESULTADOS DE LA ZONA VISCOSA CON LOS PARÁMETROS

LOS VALORES PARA LA SECCIÓN PURAMENTE VISCOSA SON :

coeficiente de correlación

pendiente =

ordenada (J=0) =

viscosidad newtoniana =

REALIZA EL CALCULO DE J lineal

PRESENTA LA TABLA DE RESULTADOS DE TIEMPO VS J lineal

PRESENTA EL GRAFICO DE TIEMPO VS J Y J lineal

PREGUNTAR SI DESEA ELEGIR OTRO PUNTO

SI LA RESPUESTA ES SI ENTONCES REGRESA AL INICIO DEL PROCEDIMIENTO

EN CASO CONTRARIO

FIN

PROCEDIMIENTO **MENÚ FINAL**

INICIO

PRESENTA EL SIGUIENTE MENÚ

MENÚ

1) REALIZAR OTRO CALCULO

2) REGRESAR AL MENU PRINCIPAL

3) SALIR DEL PROGRAMA

PREGUNTAR "¿OPCIÓN ?

SI RESPUESTA = 1 ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **TRATAMIENTO DE DATOS**

SI RESPUESTA = 2 ENTONCES REGRESA AL MENÚ PRINCIPAL

SI RESPUESTA = 3 ENTONCES VE AL PROCEDIMIENTO LLAMADO **FIN DE PROGRAMA**
FIN

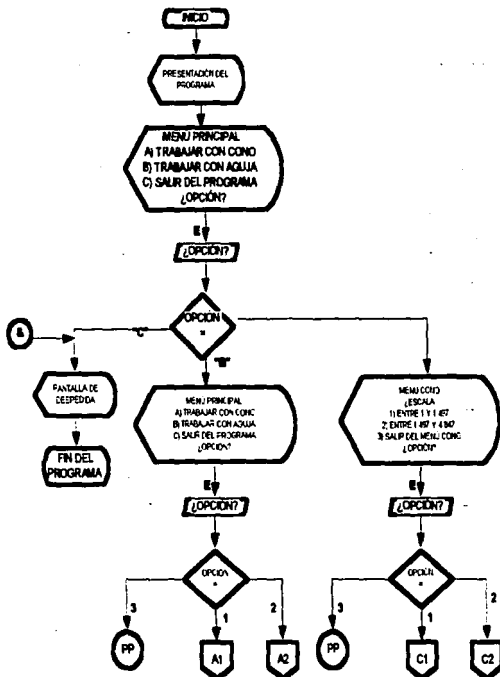
PROCEDIMIENTO **FIN DE PROGRAMA**
INICIO
PRESENTA PANTALLA DE DESPEDIDA
TERMINA LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.
FIN

3. ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO El diagrama de flujo es la representación gráfica de cada uno de los pasos que componen al algoritmo, cada paso es representado mediante símbolos, dichos símbolos difieren uno a otro según el tipo de operación que se está realizando.

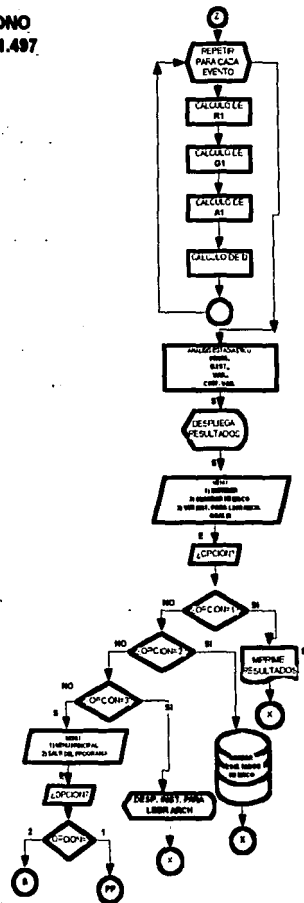
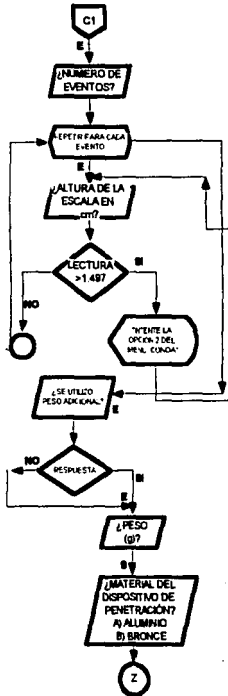
A continuación se presenta el diagrama de flujo para la solución del problema no. 1, este algoritmo está basado en el Algoritmo para el programa TEXTURA presentado en el paso 2. La descripción de la simbología usada en este diagrama se localiza en el Anexo II.

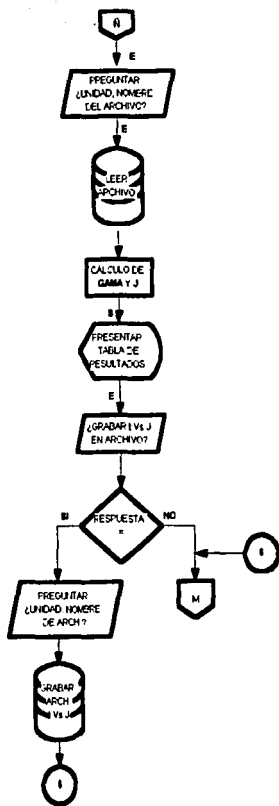
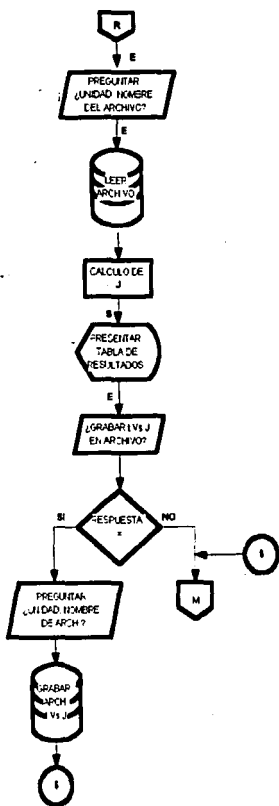
Debido a que el diagrama de flujo para los procedimientos de cálculo de las 4 opciones (CONO1, CONO2, AGUJA y AGUJA2) son similares y solamente difieren en las fórmulas empleadas solamente se presenta el diagrama para el procedimiento CONO1.

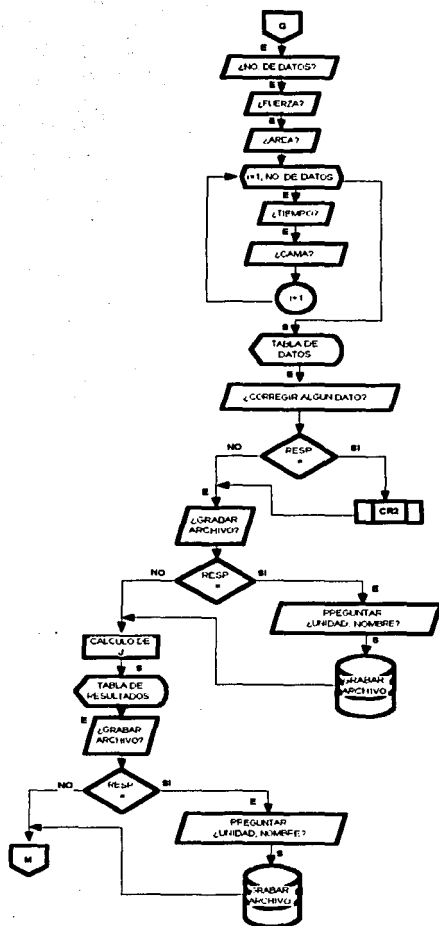
Figura No. 2.1
Diagrama de Flujo Programa TEXTURA

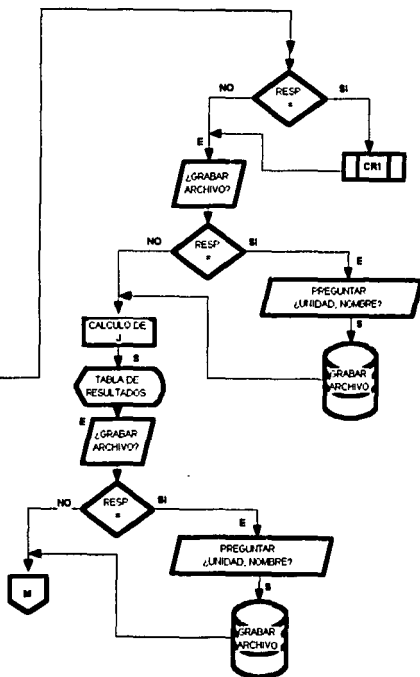
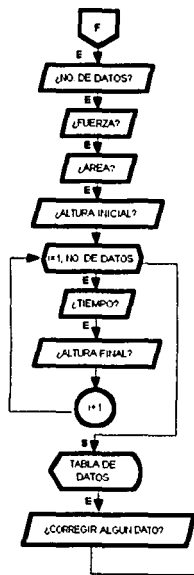


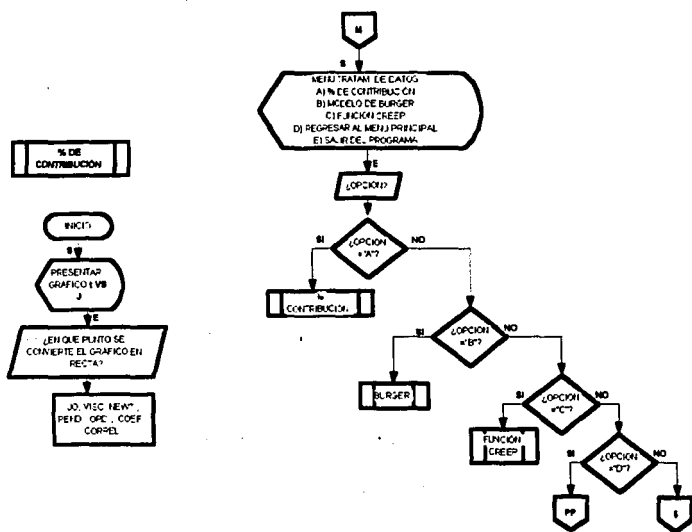
**OPCIÓN CONO
ESCALA 0- 1.497.**











4. SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Para la solución de los problemas planeados en el paso 1 se decidió realizar ambos programas en el lenguaje de programación TURBO PASCAL V7.0 de BORLAND®; la selección de este lenguaje se hizo basándose en que como se trata de dos programas sencillos y aunque uno de ellos requiere desplegar ciertos gráficos, estos no son muy complicados y pueden ser mostrados eficientemente en este lenguaje de programación, por tal razón no es necesario usar un equipo muy sofisticado, lo que brinda la ventaja que ambos programas puedan utilizarse en cualquier equipo de computación con características de hardware básicas.

5. **CODIFICACIÓN** Este paso consiste en traducir el algoritmo en el lenguaje de programación seleccionado en el paso anterior. En este trabajo no se incluyen los códigos de los programas.

6. **COMPILACIÓN** Los códigos de ambos programas fueron compilados usando el compilador de TURBO PASCAL V. 7.0 de Borland® al primer programa se le dio el nombre TEXTURA.EXE y al segundo CREEP.EXE. En el caso de este último el disco cuenta con varios archivos adicionales, los cuales son necesarios para la presentación de los gráficos, así como librerías de funciones matemáticas, ejemplos, etc.

7. **DEPURACIÓN DEL PROGRAMA** Es necesario realizar toda clase de pruebas con la finalidad de que no existan fallos o errores tales como de sintaxis, lógica, etc. dentro del programa. Si existiera alguna debe corregirse el código hasta que el programa funcione correctamente.

Una vez que se concluyó la codificación de ambos programas, se hicieron bastantes pruebas con la finalidad de detectar errores de lógica y/o sintaxis. Durante la ejecución inicial en ambos se encontraron diversos errores, tales como interrupciones inesperadas, despliegue de errores de sintaxis y/o lógica, etc. Mismos que fueron eliminándose conforme fueron apareciendo hasta que el programa en una ejecución normal ya no presenta ningún error. Para la solución de los errores mencionados, fue necesario realizar varias versiones de ambos programas hasta que se llegó a su versión final.

8. **PRUEBA** Es necesario hacer todas las pruebas necesarias con datos o información real de problemas que hayan sido resueltos anteriormente por medio de algún otro método, ya sea manual o computacional, pero que se conozcan los resultados con la finalidad de detectar alguna falla del programa la cual pueda producir resultados falsos o erróneos. Si se detectara algún error en los resultados, es necesario revisar nuevamente tanto el algoritmo, el diagrama de flujo y la codificación con la finalidad de detectar el problema y solucionar dichos errores. Una vez corregidos los mismos, se debe hacer nuevamente la prueba del programa, este procedimiento deberá repetirse hasta que el programa no produzca ningún error, en este momento se puede decir que el programa ha sido terminado.

Una vez concluida la codificación y realizadas todas las pruebas de depuración, se procedió a realizar pruebas en los programas TEXTURA y CREEP utilizando datos supuestos y experimentales, estas pruebas se realizan con la finalidad de detectar algún error de codificación que pudiera producir resultados falsos o erróneos. Los resultados obtenidos con los programas fueron comparados con resultados obtenidos mediante hojas de

cálculo especialmente diseñadas para el análisis de datos de pruebas de dureza y de Creep en Microsoft Excel. La comparación de los resultados es presentada en el siguiente capítulo "Prueba de los programas".

Una vez que se han hecho todas las modificaciones necesarias y que se ha observado que ambos programas obtienen resultados correctos basados en la comparación con las hojas de cálculo y en el caso del programa CREEP con los datos reportados bibliográficamente, se procede al último paso de la metodología de programación.

9. IMPLEMENTACIÓN. Cuando se han realizado todas las pruebas necesarias, y el programa funciona correctamente, puede ser este instalado en los equipos donde se va a utilizar, para llevar a cabo la instalación o implementación se deben llevar a cabo las siguientes operaciones:

- a) Instalación del programa en el equipo
- b) Capacitación a los principales usuarios en el uso, alcances y limitaciones del programa

Debe señalarse que una vez instalado o implementado el programa, aún pueden ocurrir ciertos errores o complicaciones que pudieron no ser detectadas durante las pruebas, lo que hace necesario la corrección de ellas para un óptimo funcionamiento, es por ello que en el momento de que se realiza un programa, se debe considerar todos los factores posibles que hagan que el programa que se está diseñando, sea funcional durante mucho tiempo y que requiera el mínimo de modificaciones y que en caso de que sean estas necesarias, se puedan realizar fácil y rápidamente, lo que lo convertirá en un programa funcional.

Una vez que se han concluido la depuración y pruebas tanto del programa TEXTURA como del programa CREEP y que se ha llegado a su versión final de ambos, se procedió a su implementación la cual se realizó en diversos equipos de LAPRYFAL DE LA FES-C UNAM. Debido a que es en este lugar donde se realizan la mayoría de las pruebas de penetración y de Creep dentro de la facultad. Este laboratorio cuenta con el equipo de computo suficiente el cual tiene las características necesarias para la ejecución del programa.

Con la implementación de los programas concluye la solución de los problemas planteados en el paso 1 de esta metodología.

CAPITULO III PRUEBA DE LOS PROGRAMAS

A) PRUEBA DEL PROGRAMA TEXTURA

Para realizar la prueba del programa TEXTURA, se ingresaron datos de distancia de penetración, los cuales se encuentran dentro de los límites de longitud de los dispositivos de penetración utilizados (cono y aguja) en cada una de las opciones del programa.

Cuando el usuario ingresa algún valor que se encuentra fuera de los límites correspondientes a cada una de las opciones del programa, este despliega un mensaje advirtiéndolo al usuario de ello, y al mismo tiempo sugiere que se use la opción correcta del programa.

Los datos ingresados al programa TEXTURA fueron alimentados a una hoja de cálculo previamente diseñada en Excel, finalmente se hizo la comparación de ambos resultados. Lo que se obtuvo fue lo siguiente:

CASO I: SOLAMENTE PENETRA PARTE DEL CONO DE 18°

En la primera prueba, se supusieron las siguientes condiciones:

- Se utilizaron tres lecturas las cuales son:

Prueba No.	Lectura (cm)
1	0.35
2	0.36
3	0.37

- Se utilizó como dispositivo de penetración el cono de aluminio
- Se utilizó un peso adicional de 50g

Estas condiciones de experimentación se resumen en la Tabla No. 3.1a.

Nota: La nomenclatura utilizada durante este capítulo se resume en el anexo II.

Tabla No. 3.1a
CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN
CASO I

NOMBRE	SÍMBOLO	
ANGULO DEL CONO I	GRADOS	15.0000
ANGULO EN RADIANES		0.2618
PESO ADICIONAL	PA (g)	50.0000
MATERIAL DEL DISPOSITIVO		ALUMINIO
PESO DEL DISPOSITIVO	PD (g)	82.5000
PESO TOTAL	PT (g)	132.5000

Con estas suposiciones, los datos fueron alimentados al programa TEXTURA y a Excel, presentado los siguientes resultados.

Tabla No. 3.2a
CÁLCULO DE DUREZA USANDO UN PENETRÓMETRO UNIVERSAL
CASO I: SOLAMENTE PENETRA A LA MUESTRA UNA PARTE DEL CONO DE 18°
RESULTADOS OBTENIDOS CON PROGRAMA TEXTURA Y CON EXCEL

No.	LECTURA (cm)	TEXTURA DUREZA (Dinas/cm ²)	EXCEL DUREZA (Dinas/cm ²)	DIFERENCIA ABSOLUTA	% DE DIFERENCIA	RELACIÓN CV EXC. / CV TEXT.
1	0.35	1217659.8690	1217559.6578	100.21	0.01	
2	0.36	1150951.6509	1150856.9296	94.72	0.01	
3	0.37	1089578.7725	1089489.1021	89.67	0.01	
PROM.	0.36	1162790.0978	1162636.2298	94.87	0.01	
C.V.	1.6038	3.1630	5.5572	2.39	43.08	1.78

CASO II: PENETRA TODO EL CONO DE 18° Y PARTE DEL CONO DE 48°

En esta prueba, se supusieron las siguientes condiciones:

- Se utilizaron tres lecturas las cuales son:

PRUEBA NO.	LECTURA (cm)
1	1.51
2	1.52
3	1.53

- Se utilizó como dispositivo de penetración el cono de aluminio
- Se utilizó un peso adicional de 50g.

Las condiciones experimentales se resumen en la Tabla No. 3.3a.

Tabla No. 3.3a
CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN
CASO II

NOMBRE	SÍMBOLO Y UNIDADES	
PESO ADICIONAL	PA (g)	50.0000
MATERIAL DEL DISPOSITIVO		ALUMINIO
PESO DEL DISPOSITIVO	PD (g)	82.5000
PESO TOTAL	PT	132.5000
ÁREA DEL CONO OCULTO	ACO (cm)	0.7100
ÁREA DEL CONO DE 15 GRADOS	A1 (cm)	1.9478

Con estas suposiciones, los datos fueron alimentados al programa TEXTURA y a la hoja de cálculo Excel, los resultados obtenidos en ambos casos son resumidos en la siguiente tabla:

Tabla No. 3.4a
CÁLCULO DE DUREZA USANDO UN PENETRÓMETRO UNIVERSAL
CASO II: PENETRA A LA MUESTRA TODO EL CONO DE 15° Y PARTE DEL CONO DE 48°
RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA TEXTURA Y CON EXCEL

No.	LECTURA (cm)	TEXTURA DUREZA (Dinas/cmf)	EXCEL DUREZA (Dinas/cmf)	DIFERENCIA ABSOLUTA	% DE DIFERENCIA	RELACIÓN CV EXC. / CV TEXT.
1	1.5100	65134.3630	65134.3630	0.00	0.00	
2	1.5200	63944.2239	63944.2239	0.00	0.00	
3	1.5300	62769.8506	62769.8506	0.00	0.00	
PROM.	1.5200	63949.4792	63949.4792	0.00	0.00	
C.V.	0.3798	1.0650	1.8487	0.78	42.39	1.74

CASO III: PENETRA PARTE DEL CONO DE LA AGUJA

En esta prueba, se supusieron las siguientes condiciones:

- Se utilizaron tres lecturas las cuales son:

Prueba No.	Lectura (cm)
1	0.21
2	0.22
3	0.23

- Se utilizó un peso adicional de 50g

Las condiciones de experimentación se resumen en la tabla No. 3.5a.

Tabla No. 3.5a
CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN
CASO III

NOMBRE	SÍMBOLO Y UNIDADES	
PESO ADICIONAL	PA (gr)	50.0000
PESO DEL DISPOSITIVO	PD (gr)	50.0000
PESO TOTAL	PT (gr)	100.0000
No. DE LECTURAS		3

Con estas condiciones, los datos fueron alimentados al programa TEXTURA y a la hoja de cálculo de Excel, ambos presentaron los resultados que se muestran en la Tabla No. 3.6a.

Tabla No. 3.6a
CÁLCULO DE DUREZA USANDO UN PENETRÓMETRO UNIVERSAL
CASO III: PENETRA A LA MUESTRA PARTE DEL CONO DE LA AGUJA
RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA TEXTURA Y CON EXCEL

No.	LECTURA (cm)	TEXTURA DUREZA (Dinas/cmf)	EXCEL DUREZA (Dinas/cmf)	DIFERENCIA ABSOLUTA	% DE DIFERENCIA	RELACIÓN CV EXC. / CV TEXT.
1	0.2100	6935722.7091	6935203.0931	519.62	0.01	
2	0.2200	6319532.4684	6319059.0167	473.45	0.01	
3	0.2300	5781954.0921	5781520.9151	433.18	0.01	
PROM.	0.2200	6346736.4233	6346261.0083	475.41	0.01	
C.V.	2.6243	5.1294	9.0979	3.97	43.62	1.77

CASO IV: PENETRA TODO EL CONO DE LAGUJA Y PARTE DE LA VARILLA

En esta prueba, se supusieron las siguientes condiciones:

- Se utilizaron tres lecturas las cuales son:

Prueba No.	Lectura (cm)
1	0.71
2	0.72
3	0.73

- Se utilizó un peso adicional de 50g
- Las condiciones de experimentación se resumen en la Tabla No. 3.7a.

Tabla No. 3.7a
CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN
CASO IV

NOMBRE	SÍMBOLO Y UNIDADES	
PESO ADICIONAL	PA (g)	50.0000
PESO DEL DISPOSITIVO	PD (g)	50.0000
PESO TOTAL	PT (g)	100.0000
ÁREA DEL CONO DE LA AGUJA	A1 (cm ²)	0.1530
No. DE LECTURAS		3

Con estas condiciones, los datos fueron alimentados al programa TEXTURA y a la hoja de cálculo de Excel, los cuales presentaron los resultados mostrados en la Tabla No. 3.8a.

Tabla No. 3.8a
CÁLCULO DE DUREZA USANDO UN PENETRÓMETRO UNIVERSAL
CASO IV: PENETRA A LA MUESTRA TODO EL CONO DE LA AGUJA Y PARTE DE LA VARILLA
RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA TEXTURA Y CON EXCEL

No.	LECTURA (cm)	TEXTURA DUREZA (Dinas/cm ²)	EXCEL DUREZA (Dinas/cm ²)	DIFERENCIA ABSOLUTA	% DE DIFERENCIA	RELACIÓN CV EXC. / CV TEXT.
1	0.7000	681794.7562	682121.9828	327.21	0.05	
2	0.7100	667226.4922	667539.8815	313.37	0.05	
3	0.7200	653267.7790	653568.1708	300.39	0.05	
PROM.	0.7100	667429.6788	667743.3316	313.66	0.05	
CV.	0.8132	1.2251	2.1382	0.91	42.70	1.75

COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CUATRO CASOS

Como se puede observar en las tablas que corresponden a los resultados obtenidos con el programa TEXTURA y con EXCEL, en la mayoría de los casos, los valores de dureza obtenidos con ambos programas difieren entre sí, con excepción de la tabla no. 3.4a que corresponde al caso en el cual penetra a la muestra todo el cono de 15° y parte del cono de 45° (Caso II) en donde la dureza calculada con el programa TEXTURA y con Excel son

Iguals. En la tabla no. 2a, el promedio (PROM.) de los valores de la Dureza presenta una diferencia de 94.87 Dinasc/cm² que corresponde a un 0.01%.

Para el caso en que penetra solamente parte del cono de la aguja (Caso III) Como se observa en la Tabla No. 3.5a, los resultados obtenidos usando el programa y la hoja de cálculo presentan una diferencia de 475.41, la cual corresponde a un 0.01%.

Finalmente el Caso IV en donde entra todo el cono de la aguja y parte de la varilla, en la Tabla No. 3.8 se muestra que los valores de dureza calculados con el programa y con la hoja de cálculo tienen una diferencia de 313.66 Dinasc/cm² que corresponde a un 0.05%.

En todos los casos el porcentaje de diferencia entre los valores de dureza obtenidos con el programa y con la hoja son menores al 1%. Analizando el coeficiente de variación, en los cuatro casos el obtenido con Excel es mayor que el obtenido con el programa TEXTURA, en una relación aproximada de 1.75 veces, esto se debe a la diferencia en cifras significativas que se manejan en ambos programas para obtener los resultados.

Finalmente es necesario mencionar que el tiempo que se invirtió para ingresar los datos al programa TEXTURA y para obtener los resultados fue de aproximadamente un minuto, mientras que el tiempo para diseñar la hoja de cálculo, ingresar los datos y obtener los resultados, en los cuatro casos fue superior a los 20 minutos, esta comparación da una idea del considerable ahorro de tiempo que se tiene al utilizar un programa especialmente diseñado para realizar ciertos cálculos. Todo lo anterior permite concluir que el uso del programa TEXTURA es una excelente opción para el cálculo de la dureza en materiales evaluados en un Penetrómetro Universal.

B) PRUEBA DEL PROGRAMA CREEP

Para llevar a cabo la prueba del programa "CREEP", los resultados que se obtuvieron de él fueron comparados con los resultados obtenidos con la hoja de Cálculo Excel y con el programa CURVE EXPERT V1.3 (CE). Para ello se utilizaron 5 series de datos diferentes (J vs t), las tres primeras se obtuvieron de los parámetros reportados por Purkayastha y colaboradores (1985) para queso Cheddar y papa fresca. La serie de datos No. 4, se obtuvo de los parámetros reportados por Barbosa-Cánovas (1997) para una muestra de goma Xantana adicionada con iones de Hierro al 1.0%. Estos posteriormente se sustituyeron en la ecuación 3c y se obtuvo la serie de datos de tiempo contra compliance. A diferencia de las 4 primeras series de datos, la No. 5 se trata de una muestra de "mousse" de chocolate elaborada en el laboratorio, la cual fue sometida a la prueba de Creep, de esta prueba se obtuvo la serie de datos de tiempo Vs Compliance (J experimental).

Las series de datos de tiempo contra compliance de las cinco muestras se sometieron al análisis usando los tres programas, arrojando como resultado los parámetros reológicos calculados de cada muestra. Estos parámetros calculados fueron comparados con los reportados en el artículo (muestras 1 a 4). Los parámetros calculados se sustituyeron también en la ecuación (3c) para obtener una nueva serie de tiempo Vs Compliance (t Vs J) denominada en este caso " J calculada" a cada serie de " J calculada" obtenida con cada uno de los programas se comparó con la serie de " J experimental" mediante el promedio del valor absoluto de las diferencias entre los valores de J experimental y J calculada, dichos datos nos indicaron en promedio que tan alejadas se encontraban las series de datos calculadas con respecto a las experimentales o reportadas bibliográficamente, pero principalmente que diferencia existe entre los resultados obtenidos con el programa "CREEP", Excel y el programa CURVE EXPERT.

Paralelo a lo anterior se hace una comparación del tiempo que consume el efectuar los cálculos con los tres programas con la finalidad de determinar en cual de ellos se invierte menos tiempo en alimentar los datos y en obtener los resultados.

MUESTRA No. 1 (Queso Cheddar)

La muestra 1 se trata de una muestra de Queso Cheddar, la cual fue sometida a una prueba de Creep desarrollada por S. PURKAYASTHA y colaboradores (1985), los parámetros obtenidos de la prueba de Creep y reportados por los autores, son los siguientes:

Tabla No. 3.1b
MUESTRA 1
PARÁMETROS DE CREEP REPORTADOS PARA QUESCHEDDAR

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
J_0	1.32	MPa ⁻¹
$1/\eta_0$	4.54e ⁻³	MPa ² s ⁻¹
J_1	5.39	MPa ² s
T_1	9.72	s
J_2	0.95	MPa ² s
T_2	82.2	s

S. PURKAYASTHA y colaboradores (1985)

A) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 1 ELEMENTO KELVIN

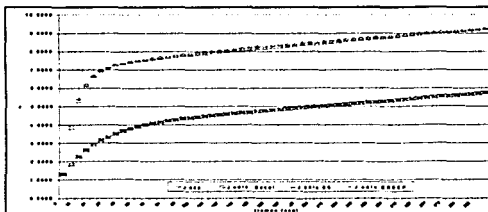
En la tabla 3.2b se muestran los parámetros del modelo de Burger con un elemento Kelvin.

Tabla No. 3.2b
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP (1 ELEMENTO KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	1.32	1.3877	1.32	MPa ⁻¹
$1/\eta_0$	0.0054	0.0060	0.0054	MPa ² s
η_0	185.9172	164.7048	185.9172	MPa ² s
J_1	2.5834	5.8547	2.5834	MPa ² s
T_1	28.4728	11.1231	28.4728	s
η_1	11.0215	1.9097	11.0215	Mpa ² s

En la tabla anterior se observa que el valor de los parámetros obtenidos con Excel y con CREEP son iguales, no así los que fueron obtenidos con CURVE EXPERT que aunque mantienen una tendencia muy similar a los otros, la diferencia con respecto a estos es evidente, lo anterior se atribuye principalmente al método de análisis utilizado en CURVE EXPERT ya que este es basado en aproximaciones sucesivas, mientras que en CREEP y en Excel se utiliza el procedimiento basado en el método gráfico de Inokuchi descrito en el Capítulo I "Generalidades".

Figura No. 3.1
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL VS J CALCADA
(1 ELEMENTO KELVIN)



En la figura No. 3.1 se puede observar que las curvas de J experimental y J calculada evaluadas con CURVE EXPERT, están casi sobrepuestas, no así las curvas de J calculada evaluadas con Excel y con CREEP que entre ellas sí están sobrepuestas, pero a su vez se encuentran muy por debajo de la curva de J experimental. Para esta muestra en particular el método de análisis que se utiliza en CURVE EXPERT y para el modelo de Burger con un tiempo de da un mejor ajuste a los datos experimentales.

B) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 2 ELEMENTOS KELVIN

En la Tabla No. 3.3b se presentan los parámetros del modelo de Burger con 2 elementos Kelvin.

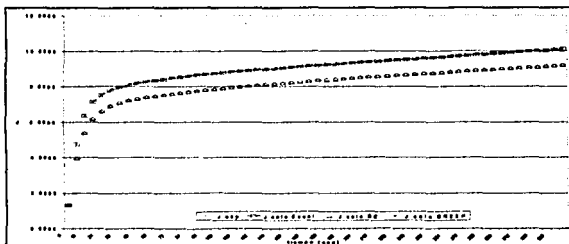
Tabla No. 3.3b
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP
(2 ELEMENTOS KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	1.32	1.32	1.3199	MPa ⁻¹
$1/\eta_1$	0.0045	0.0054	0.0045	MPa ^s ⁻¹
J_1	5.39	1.1162	5.3900	MPa ^s
T_1	9.72	40.1870	9.4200	40.1883 S
η_2	1.8033	36.0077	1.7476	36.0077 MPa ^s
J_2	0.95	5.8297	0.9500	5.8295 MPa ^s
T_2	82.2	7.3887	82.2023	7.3891 S
η_3	86.5263	1.2675	86.5287	1.2675 MPa ^s

En esta Tabla No. 3.3b se muestra claramente que los resultados obtenidos con Excel y con CREEP, son iguales, mientras que los que se obtienen con CURVE EXPERT no se parecen a estos aunque son del mismo orden de magnitud. Ahora si se comparan los

resultados obtenidos con los tres programas con los que reportan Purkayastha y colaboradores en el artículo, puede observarse que los parámetros obtenidos con CURVE EXPERT son prácticamente iguales a los reportados por los autores, no así los obtenidos con CREEP y con Excel.

Figura No. 3.2
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCADA
(2 ELEMENTOS KELVIN)



En la Figura No. 3.2 se observa que la curva de J experimental y J calculada obtenida con CURVE EXPERT están sobrepuestas, mientras que las obtenidas con Excel y con el programa CREEP, aunque entre ellas también se encuentran sobrepuestas, éstas se encuentran por arriba de la curva de J experimental. Esto nos permite concluir que el comportamiento reológico de la muestra de Queso Cheddar se encuentra caracterizado por el modelo de Burger con 2 elementos Kelvin.

C) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP USANDO LA FUNCIÓN CREEP

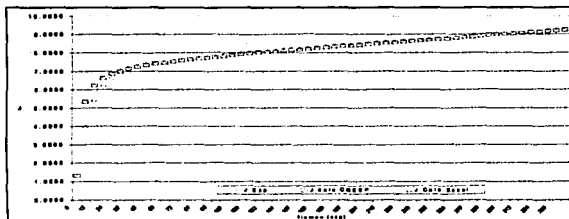
Tabla No. 3.4b
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN CREEP
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
K_0	1.3200	—————	1.3200	MPa ⁻¹
K_1	0.0054	—————	0.0054	MPa ^s ⁻¹
K_2	0.5271	—————	0.5271	MPa ⁻¹
K_3	0.1627	—————	0.1627	MPa

En la Tabla No. 3.4b se presentan los parámetros del modelo simplificado de Burger (Función Creep), en la cual se aprecia que los valores de los parámetros obtenidos con Excel y con CREEP son iguales. El programa CURVE EXPERT no puede calcular los

parámetros de la función Creep en esta muestra, es por esta razón que en la tabla no son mostradas.

Figura No. 3.3
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL VS J CALCADA
(FUNCIÓN CREEP)



En el gráfico No. 3.3 puede observarse que tanto la curva de J experimental como la de J calculada evaluada con Excel y con CREEP, están sobrepuestas en la mayoría de los puntos, lo que significa que para este caso en particular el modelo simplificado de Burger llamado Función Creep, describe adecuadamente el comportamiento reológico de la muestra.

Tabla 3.5b
MUESTRA 1 QUESO CHEDDAR
COMPARACIÓN ENTRE PROGRAMAS

	*PVAD J experimental Y J calculada		
	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP
1 ELEMENTO KELVIN	3.46	1.00	3.46
2 ELEMENTOS KELVIN	0.86	0.00	0.87
FUNCIÓN CREEP	0.23	—	0.23

*PROMEDIO DEL VALOR ABSOLUTO DE LA DIFERENCIA ENTRE J experimental Y J calculada

En la Tabla No. 3.5b se muestra que el menor promedio de diferencias entre los valores de J experimental y J calculada se obtuvo cuando se usó el modelo simplificado de Burger para realizar el análisis de la muestra de queso Cheddar. Concluyendo que para esta muestra en especial este modelo fue el que mejor describió el comportamiento reológico presentando los datos obtenidos un mejor ajuste en comparación con el modelo de Burger con 1 y 2 elementos Kelvin.

D) PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE BURGER A LA DEFORMACIÓN TOTAL EN LA CURVA DE CREEP

Con la finalidad de conocer de manera detallada como es el comportamiento reológico de la muestra, se hace necesario determinar en que manera contribuye cada uno de los elementos del modelo de Burger a la deformación total, para obtener dichos porcentajes, se hizo uso del programa CREEP, el cual ha sido diseñado para efectuar dicho cálculo, el tiempo aproximado en que el programa realizó los cálculos fue de 30 segundos, tomando en cuenta que ya se tenía el archivo de datos de la serie de tiempo Vs compliance. Los resultados obtenidos por CREEP son mostrados en la Tabla No. 3.6b.

Tabla No. 3.6b
MUESTRA QUESO CHEDDAR
CONTRIBUCIÓN DE CADA ELEMENTO LA DEFORMACIÓN TOTAL

ELEMENTO	PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN
J_1	100.00
J_0	14.35
J_{e0}	80.33
J_v	13.20
J_p	6.47
J_r	72.45
J_{vr}	65.98

La tabla 3.6b muestra que J_r (zona de retardo) tiene el mayor porcentaje de contribución con un 72.45%, del cual la deformación elástica del elemento Kelvin (J_{vr}) contribuye con un 65.98% y el elemento J_p "Deformación Viscosa del elemento Kelvin" con 6.47%. Posteriormente en menor proporción el elemento que caracteriza a la "deformación elástica instantánea" (J_0) el cual contribuye con 14.35% y finalmente el elemento que caracteriza a la "deformación puramente viscosa" (J_v) contribuye con un 13.20%. Lo anterior indica que la muestra tiene un comportamiento viscoelástico el cual tiende más hacia el comportamiento elástico que hacia el comportamiento viscoso. El porcentaje de J_{e0} es la suma de los elementos elástico instantáneo (J_0) y la deformación retardada (J_r).

E) ANÁLISIS DE RESULTADOS MUESTRA 1 (QUESO CHEDDAR)

Debe tomarse en cuenta que aunque CURVE EXPERT evaluó correctamente los parámetros de la muestra, en la vida real no siempre se tienen bases de comparación como en este caso que se tienen los resultados reportados en el artículo, por lo tanto se tendría que decidir si tomar los parámetros con 1 elemento Kelvin o con dos, ya que este programa describió correctamente la curva de Creep usando ambos modelos, si se

hubieran elegido los parámetros con un elemento Kelvin, se caería en un error ya que estos no son iguales a los reportados por los autores.

Otro aspecto que es importante señalar es que tanto los resultados obtenidos con CREEP y con Excel, usando el modelo de Burger con 2 elementos Kelvin son muy parecidos a los reportados en el artículo y aunque los tiempos de retardo son menores estos mantienen el mismo orden en magnitud, y aunque no son iguales a los reportados por los autores, esto no significa que sean incorrectos ya que como se ha mencionado anteriormente el método que se ha empleado para obtener los resultados en este programa es gráfico y como tal está expuesto a los diferentes puntos de vista que pueden tener los usuarios, otra aspecto importante es que se está partiendo de unos datos reportados en un artículo, y que no se conocen el número de cifras significativas con que trabajaron los autores, para realizar los cálculos, en este trabajo se supuso un número de observaciones al azar, las cuales en el experimento real pudo ser un número mayor o menor, también se supuso un intervalo entre cada tiempo al azar el cual en el experimento pudo ser diferente. Otro factor importante a considerar es que para el tratamiento de los datos, en el artículo también se utilizó un paquete matemático y estadístico llamado BMDP. Todos estos factores en conjunto hacen la diferencia con los resultados reportados por los autores,

MUESTRA No. 2 (Queso Cheddar)

La muestra No. 2 se trata de una segunda muestra de Queso Cheddar, la cual fue sometida a la prueba de Creep, en el artículo se reportan los resultados como parámetros del modelo simplificado de Burger "Función Creep" (Tabla No. 3.7b). De la misma forma que la muestra anterior, esta prueba fue desarrollada por S. PURKAYASTHA y colaboradores (1985). Con estos parámetros se generó la serie de datos "experimentales" (ecuación 4e), a partir de los cuales se calcularon los parámetros del modelo de Burger con 1y 2 elementos Kelvin y el modelo simplificado de Burger usando los programas Excel, Curve Expert y CREEP.

Tabla No. 3.7b
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN CREEP REPORTADOS PARA QUESO CHEDDAR

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
K_0'	1.36E+00	MPa ⁻¹
K_1'	4.98E-3	MPa*s ⁻¹
K_2'	18	MPa ⁻¹
K_3'	0.71	MPa

S. PURKAYASTHA y colaboradores (1985)

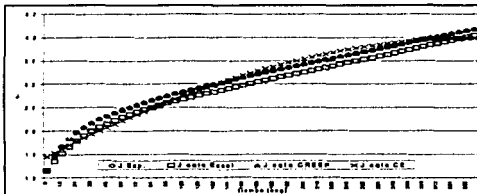
A) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 1 ELEMENTO KELVIN

En la Tabla No. 3.8b se presentan los parámetros de Creep con 1 elemento Kelvin.

Tabla No. 3.8b
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP (1 ELEMENTO KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	1.36	1.65	1.36	MPa^{-1}
$1/\eta_0$	0.01	0.03	0.01	$MPa \cdot s^{-1}$
η_0	177.19	30.98	177.19	$MPa \cdot s$
J_1	0.95	11.98	0.95	$MPa \cdot s$
T_1	33.07	-627.63	33.07	s
η_1	34.79	-52.40	34.79	$MPa \cdot s$

Figura No. 3.4
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA
(1 ELEMENTO KELVIN)



En la figura anterior se puede observar que las curvas generadas con Excel y con CREEP, están sobrepuestas una con otra, y a su vez ambas conservan la misma tendencia que la curva experimental, no así la curva generada con CURVE EXPERT, la cual aunque en varios puntos cruza con la curva experimental, no conserva la misma tendencia, lo que permite afirmar que los parámetros obtenidos con este programa, no describen correctamente el comportamiento reológico de la muestra. Esto último puede ser confirmado al observar la Tabla No. 3.8b, en la cual los parámetros reportados por el programa CURVE EXPERT son en el tiempo de retardo negativos, situación que en la vida real no es posible que se presente porque esta situación no tiene un significado físico real.

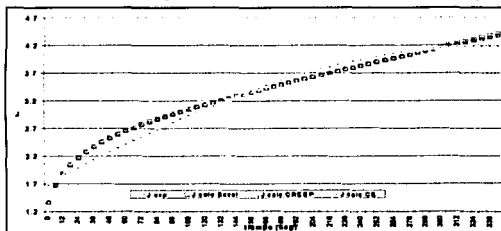
B) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 2 ELEMENTOS KELVIN

En la Tabla No. 3.9b se presentan los parámetros de Creep con dos elementos Kelvin.

Tabla No. 3.9b
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
COMPARACION DE LOS PARÁMETROS DE CREEP
(2 ELEMENTOS KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	1.36	1.68	1.36	MPa ⁻¹
$1/\eta_1$	0.01	0.02	0.01	MPa*s ⁻¹
J_1	0.87	1.42	0.87	MPa*s
T_1	34.57	-349.63	34.57	S
η_1	39.96	-247.12	39.96	MPa*s
J_2	0.25	1.42	0.25	MPa*s
T_2	6.84	-349.63	6.84	S
η_2	26.95	-247.12	26.95	MPa*s

Figura No. 3.5
MUESTRA 2
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA
(2 ELEMENTOS KELVIN)



En la Figura No. 3.5 puede observarse que tanto las curvas de "calculada" generadas con Excel y con CREEP, están sobrepuestas una con otra y además conservan la misma tendencia que la curva de J "experimental", no sucede lo mismo con la curva de J "calculada" generada con CURVE EXPERT, la cual presenta una tendencia diferente a las otras tres curvas. Ahora si se observa la tabla comparativa de los parámetros obtenidos con los tres programas (Tabla No. 3.9b) los generados con CURVE EXPERT tienen una gran diferencia en especial en la zona de retardo contra los generados con Excel y con CREEP. Debe notarse que los tiempos de retardo con CURVE EXPERT son negativos y por mucho fuera del rango del tiempo de experimentación, situación que en la vida real no es posible que se presente. además de repetirse los valores de los parámetros del elemento kelvin 1 y 2, lo cual permite afirmar que los parámetros generados con este programa no son correctos

C) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP USANDO LA FUNCIÓN CREEP

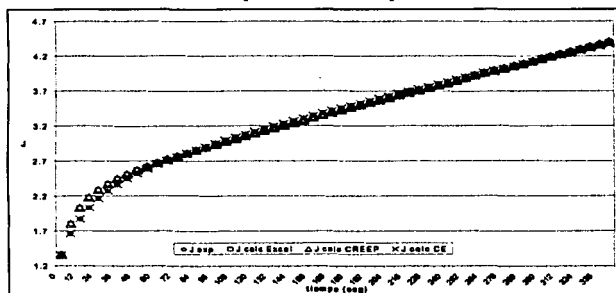
En la Tabla No. 3.10 se presentan los parámetros del modelo simplificado de Burger (Función Creep).

Tabla No. 3.10b
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN CREEP
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	ARTÍCULO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
K_0	1.36	1.36	1.36	1.36	MPa ⁻¹
K_1	4.98E-03	0.01	0.00498	0.01	MPa*s ⁻¹
K_2	18.00	9.41	18	9.41	MPa ⁻¹
K_3	0.71	0.87	0.71	0.87	MPa

En la Tabla No. 3.10b se observa que los parámetros obtenidos con CURVE EXPERT son iguales a los reportados en el artículo, mientras que los obtenidos con Excel y con CREEP entre ellos son iguales, pero presentan diferencia con los reportados en el artículo.

Figura No. 3.6
MUESTRA DE QUESO CHEDDAR
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA
(FUNCIÓN CREEP)



En la figura anterior puede observarse que las curvas generadas con los tres programas presentan una tendencia muy similar a la que presenta la curva de J "experimental", lo que permite concluir que los parámetros obtenidos con los tres programas describen adecuadamente el comportamiento reológico de la muestra de queso Cheddar cuando se usa el modelo simplificado de Burger (Función Creep).

Tabla 3.11b
MUESTRA QUESO CHEDDAR
COMPARACIÓN ENTRE PROGRAMAS

	*PVAD J experimental Y J calculada		
	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP
1 ELEMENTO KELVIN	0.156	0.131	0.157
2 ELEMENTOS KELVIN	0.014	0.133	0.014
FUNCIÓN CREEP	0.047	0.000	0.047

*PROMEDIO DEL VALOR ABSOLUTO DE LA DIFERENCIA ENTRE J experimental Y J calculada

Tal como se muestra en la tabla anterior, el menor valor del promedio de la diferencia entre J "experimental" y J "calculada" usando los tres modelos se obtiene cuando se usa para el análisis el modelo simplificado de Burger (Función Creep), lo que permite afirmar que usando este modelo se describe mejor el comportamiento reológico de esta muestra de Queso Cheddar. Lo anterior puede ser comprobado al comparar las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 las cuales muestran las curvas de Creep generadas con los tres programas usando el modelo de Burger con 1 y 2 elementos kelvin y el modelo de Burger simplificado respectivamente, en donde la figura 3.6 muestra que las 3 curvas se encuentran sobrepuestas no presentándose esta misma situación en las otras dos figuras.

D) PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE BURGER A LA DEFORMACIÓN TOTAL EN LA CURVA DE CREEP

El siguiente paso para el análisis de la muestra no. 2 (Queso Cheddar) es el cálculo del porcentaje de contribución de cada elemento del modelo de Burger a la deformación total. En la Tabla No. 3.12b se muestran los resultados obtenidos con CREEP.

Tabla No. 3.12b
MUESTRA QUESO CHEDDAR
CONTRIBUCIÓN DE CADA ELEMENTO A LA DEFORMACIÓN TOTAL

ELEMENTO	PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN
J _v	100.00
J _o	31.09
J _{sp}	56.32
J _v	30.54
J _o	13.14
J _v	38.37
J _o	25.23

Aquí se observa que el elemento que contribuye con un mayor porcentaje a la deformación total, es la deformación retardada con 38.37%, de los cuales el 25.23% corresponden al elemento que caracteriza a la deformación elástica del elemento Kelvin (J_v) y 13.14% corresponde a la deformación viscosa del elemento Kelvin, con un menor

porcentaje (31.09%), le sigue el elemento que caracteriza a la deformación elástica instantánea (J_0), y finalmente el elemento que caracteriza a la deformación puramente viscosa (J_v) el cual contribuye con 30.54%, lo anterior manifiesta que en esta muestra de Queso Cheddar, los tres elementos principales que contribuyen a la deformación total como son el elemento de la deformación elástica Kelvin y el elemento puramente viscoso contribuyen de manera muy similar a esta deformación, si se analiza el elemento Kelvin, se observará que el elemento elástico contribuye casi con el doble de lo que contribuye el elemento viscoso, por lo que esta muestra tiende más hacia el comportamiento elástico. El porcentaje de J_{e0} es la suma de los elementos elástico instantáneo (J_0) y la deformación retardada (J_0).

E) ANÁLISIS DE RESULTADOS MUESTRA 2 (Queso Cheddar)

En esta muestra se presenta el mismo caso de la muestra 1, en donde se cuenta con un punto de comparación es decir, los parámetros reportados por los autores en el artículo. Al comparar los resultados obtenidos con los reportados bibliográficamente, podemos decidir de una manera sencilla cuales son los parámetros reológicos que describen de una manera más apropiada el comportamiento reológico de la muestra. Esto no se presenta comúnmente en una situación normal de experimentación, por lo que el investigador tiene que decidir cuales son los parámetros reológicos que mejor describen el comportamiento de su muestra.

MUESTRA No. 3 (papa fresca)

La muestra No. 3, se trata de una muestra de papa fresca, la cual fue sometida a una prueba de Creep, de la misma manera que las muestras 1 y 2, esta muestra también fue evaluada por S. PURAKAYASTHA y colaboradores (1985). Los parámetros obtenidos de la prueba de Creep por los autores se muestran en la Tabla No. 3.13b.

Tabla No. 3.13b
PARÁMETROS DE CREEP REPORTADOS PARA PAPA FRESCA

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
J_0	0.43	MPa ⁻¹
$1/\eta_e$	0.0001	MPa*s ⁻¹
J_1	0.047	MPa*s
T_1	41.30	S

S. PURKAYASTHA y colaboradores (1985)

A) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP 1 ELEMENTO KELVIN

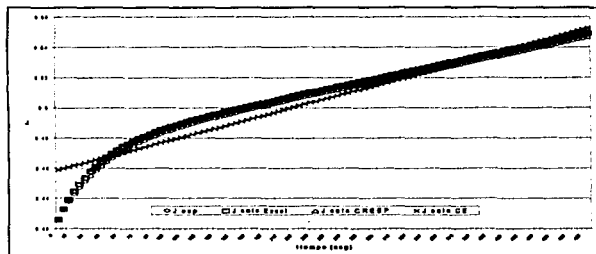
En la Tabla No. 3.14b se muestran los parámetros del modelo de Burger con 1 elemento Kelvin.

Tabla No. 3.14b
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP (1 ELEMENTO KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	ARTÍCULO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	0.43	0.43	0.46	0.43	Mpa ⁻¹
$1/\eta_0$	0.0001	0.0002	0.0003	0.0002	MPa*s ⁻¹
J_1	0.047	0.05	1664.001	0.05	MPa*s
τ_1	41.30	36.68	-237611	36.68	s
η_1	884.11	756.69	-14279.50	756.69	MPa*s

Aquí podemos observar que los valores obtenidos con CREEP y con Excel, son exactamente iguales, y estos son muy similares con los resultados reportados en el artículo. Los resultados obtenidos con CURVE EXPERT, no tienen ningún significado físico, debido a que en este tipo de pruebas no es posible reportar un tiempo de retardo negativo, y este no debe ser mayor al tiempo de experimentación, otro aspecto que nos permite descartarlos como válidos es al observar el comportamiento de la curva generada con CURVE EXPERT (Figura No. 3.7), el cual no presenta la tendencia característica de la curva de Creep.

Figura No. 3.7
MUESTRA DE PAPA FRESCA
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA (1 ELEMENTO KELVIN)



B) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 2 ELEMENTOS KELVIN

En la Tabla No. 3.15b se muestran los parámetros del modelo de Burger con 2 elementos Kelvin. Solamente están incluidos los que se obtuvieron con CURVE EXPERT, debido a que

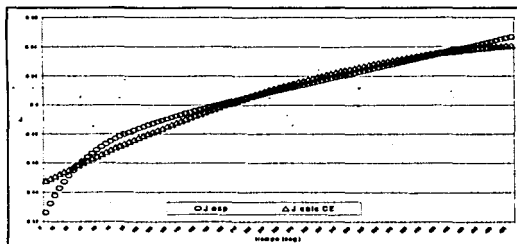
ni el programa CREEP, ni Excel pudieron calcular estos parámetros para la muestra de papa fresca.

Tabla No. 3.15b
MUESTRA DE PAPA FRESCA
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP (2 ELEMENTOS KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	_____	0.45	_____	MPa ⁻¹
$1/\eta_0$	_____	0.001	_____	MPa ^{*s} ⁻¹
J_1	_____	1.03	_____	MPa ^{*s}
τ_1	_____	-2020.69	_____	s
η_1	_____	19.70	_____	MPa ^{*s}
J_2	_____	1.03	_____	MPa ^{*s}
τ_2	_____	-2020.69	_____	s
η_2	_____	19.70	_____	MPa ^{*s}

Analizando los datos presentados en la tabla anterior deben descartarse estos valores como válidos, ya que no es posible obtener tiempos de retardo negativos o mayores al tiempo de experimentación y al observar la curva generada con CURVE EXPERT (Figura No. 3.8), la cual presenta una tendencia totalmente diferente a la de una curva de Creep. Además debe tomarse en cuenta que el comportamiento reológico de la muestra de papa, solamente está caracterizado por 1 elemento Kelvin tal como lo demuestra el artículo en los parámetros que son reportados por los autores,

Figura No. 3.8
MUESTRA DE PAPA FRESCA
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA (2 ELEMENTOS KELVIN)



C) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP USANDO LA FUNCIÓN CREEP

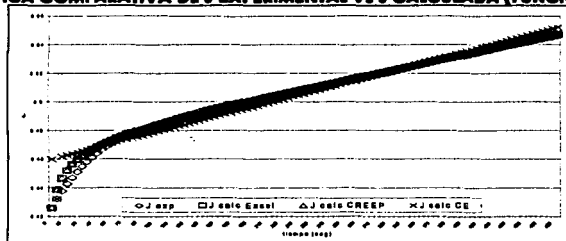
En la Tabla No. 3.16 se presentan los parámetros del modelo simplificado de Burger (Función Creep).

Tabla No. 3.16b
MUESTRA DE PAPA FRESCA
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN CREEP
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
K_0^*	0.4260	0.45990592	0.4260	MPa ⁻¹
K_1^*	0.0002	0.00018613531	0.0002	MPa*s ⁻¹
K_2^*	312.0924	-5361923.2	312.0924	MPa ⁻¹
K_3^*	20.9710	1072349.8	20.9710	MPa

En la tabla anterior se muestra que tanto los valores de J calculada con CREEP y con Excel son exactamente iguales, no así los que se obtuvieron con CURVE EXPERT, los cuales son totalmente diferentes a los otros dos.

Figura No. 3.9
MUESTRA DE PAPA FRESCA
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA (FUNCIÓN CREEP)



En la gráfica anterior se muestra que las curvas generadas con CREEP y con Excel, presentan la misma tendencia que la curva experimental, no así la curva generado con CURVE EXPERT, la cual su tendencia es muy diferente a las otras tres curvas.

Tabla 3.17b
MUESTRA PAPA FRESCA
COMPARACIÓN ENTRE PROGRAMAS

	*PVAD J experimental Y J calculada		
	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP
1 ELEMENTO KELVIN	0.003	0.003	0.003
2 ELEMENTOS KELVIN	---	0.004	---
FUNCIÓN CREEP	0.002	0.005	0.002

*PROMEDIO DEL VAOR ABSOLUTO DE LA DIFERENCIA ENTRE J experimental Y J calculada

Al analizar la tabla anterior, es evidente observar que el promedio de la diferencia entre los valores de J "experimental" y J "calculada" generados con los tres programas y usando el modelo de Burger con 1 y 2 elementos kelvin y el modelo de Burger simplificado

(Función Creep), son muy parecidos entre ellos, lo que significa que tanto el modelo de Burger con 1 elemento Kelvin y la función Creep describen adecuadamente el comportamiento reológico de la muestra de papa fresca. En este caso descartaremos los parámetros obtenidos con CURVE EXPERT como válidos, debido a que al momento de construir la curva calculada con este programa y usando los tres modelos, estas presentan una tendencia muy diferente a la curva experimental como se ha discutido previamente. Para la muestra de papa fresca, el modelo de Burger con dos elementos kelvin tal como se ha señalado en el inciso b) no pudo ser evaluado ni con el programa CREEP ni con Excel.

D) PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE BURGER A LA DEFORMACIÓN TOTAL EN LA CURVA DE CREEP

En la Tabla No. 3.18b se incluye el porcentaje de contribución de cada elemento del modelo de Burger a la deformación total de la muestra de papa fresca.

Tabla No. 3.18b
MUESTRA PAPA FRESCA
CONTRIBUCIÓN DE CADA ELEMENTO A LA DEFORMACIÓN TOTAL

ELEMENTO	PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN
J_r	100.00
J_e	77.96
J_{e0}	86.33
J_v	10.63
J_p	3.04
J_s	11.41
J_{kv}	8.38

La deformación total de la muestra de papa fresca se ve afectada por cada elemento del modelo de Burger de la siguiente manera: La deformación elástica instantánea (J_e) la cual caracteriza a la zona elástica de la curva de Creep, contribuye con un gran porcentaje a la deformación total (77.96), a este valor se le agrega el porcentaje con el que contribuye la deformación elástica del elemento Kelvin (J_{kv}) 8.38% y se obtiene el porcentaje de contribución de J_{e0} que corresponde a la suma de la deformación elástica instantánea y la deformación elástica del elemento Kelvin. En esta muestra, la deformación puramente viscosa (J_v) solamente contribuye con 10.63%, la deformación retardada (J_s) contribuye a la deformación total con un 11.41% de los cuales el 3.04% corresponde a la deformación viscosa del elemento Kelvin (J_p) el resto a la deformación elástica del mismo. Lo anterior indica claramente que todos los elementos elásticos, contribuyen en un mayor porcentaje que los elementos viscosos, dándole a la muestra un

mayor carácter elástico. El porcentaje de J_{e0} es la suma de los elementos elástico instantáneo (J_0) y la deformación retardada (J_r).

MUESTRA No. 4 (Muestra de goma Xantana adicionada con 1.0% de Iones de Hierro)

La muestra No. 4 se trata de un gel de Goma Xantana adicionada con Iones de Hierro al 1.0%. Los parámetros reológicos de la muestra fueron tomados del artículo "Viscoelastic Properties of Xanthan Gels Interacting With Cations" escrito por Ma. L. And G. V. Barbosa-Cánovas, publicado en la revista Journal of Food Science (1997). Los parámetros reológicos reportados en el artículo se muestran en la Tabla No. 3.19b.

Tabla No. 3.19b
PARÁMETROS DE CREEP REPORTADOS PARA GELES DE XANTANA ADICIONADA CON 1.0% DE IONES DE HIERRO

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
J_0	0.1200	Pa^{-1}
η_p	93.3200	Pa^*s
J_1	0.7230	Pa^{-1}
T_1	5.0800	S
J_2	0.3120	Pa^{-1}
T_2	0.0842	S

Con estos parámetros se obtuvo la serie de datos de tiempo Vs compliance (J experimental), la cual fue sometida a un análisis con los tres programas (Excel, CREEP y CURVE EXPERT), Análisis que es mostrado a continuación.

A) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 1 ELEMENTO KELVIN

Los parámetros reológicos de la muestra de goma Xantana con 1 elemento Kelvin son mostrados en la Tabla No. 3.20b.

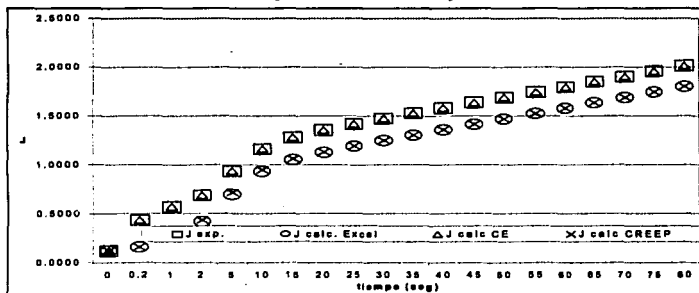
Tabla No. 3.20b
MUESTRA DE GEL DE XANTANA ADICIONADO CON IONES HIERRO 30% COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP (1 ELEMENTO KELVIN) OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	0.1200	0.2650	0.1200	Mpa^{-1}
$1/\eta_p$	0.0110	0.0113	0.0110	MPa^*s^{-1}
J_1	0.7970	0.8548	0.7970	MPa^*s
T_1	0.8088	3.2158	0.8088	s
η_1	1.0148	0.2658	1.0148	MPa^*s

En la figura 3.10 se muestra que la curva generada con Excel y con el programa CREEP se encuentran sobrepuestas, y la que fue generada con CURVE EXPERT se encuentra sobrepuesta con la curva experimental, lo que indica que para esta muestra, los

parámetros reológicos generados con CURVE EXPERT y usando el modelo de Burger con un elemento Kelvin describen de manera adecuada su comportamiento reológico.

Figura No. 3.10
MUESTRA DE GEL DE XANTANA ADICIONADO EN IONES FIERRO AL 1.0%
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCADA
(1 ELEMENTO KELVIN)



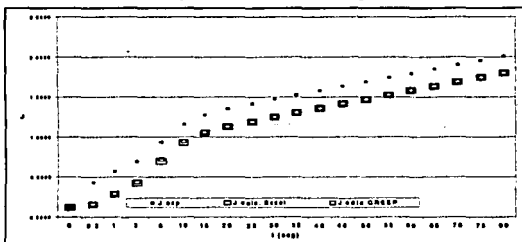
B) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 2 ELEMENTOS KELVIN

En la Tabla No. 3.21b se presentan los parámetros del modelo de Burger con 2 elementos Kelvin, en la cual puede observarse que el programa CURVE EXPERT no fue capaz de obtener los parámetros reológicos de dicha muestra. Al momento de solicitar al programa que evaluara la serie de datos de compliance y tiempo, el programa desplegó un mensaje de error donde se indicaba que se estaba intentando realizar una división entre cero, lo que automáticamente ocasionó que el programa detuviera los cálculos.

Tabla No. 3.21b
MUESTRA DE GEL DE XANTANA ADICIONADO CON IONES FIERRO AL 1.0%
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP (2 ELEMENTOS KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	0.1200	-----	0.1200	Mpa ⁻¹
$1/\eta N$	0.0110	-----	0.0110	MPa*s ⁻¹
J_1	0.7263	-----	0.7185	MPa*s
T_1	4.9132	-----	4.7039	s
VISC. 1	6.7648	-----	6.5469	MPa*s
J_2	0.3002	-----	0.2972	MPa*s
T_2	0.0720	-----	0.0694	s
VISC. 2	0.2400	-----	0.2336	MPa*s

Figura No. 3.11
MUESTRA DE GEL DE XANTANA ADICIONADO CON IONES FIERRO AL 1.0%
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA
(2 ELEMENTOS KELVIN)



En la figura anterior se muestra que las curvas generadas con Excel y con el programa se encuentran sobrepuestas entre sí. Esto puede ser confirmado al observar la Tabla No. 3.21b, en donde los parámetros generados con estos dos programas son iguales.

C) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP USANDO LA FUNCIÓN CREEP

En la Tabla No. 3.22b se presentan los parámetros del modelo simplificado de Burger (Función Creep). En este caso los tres programas fueron capaces de calcular los parámetros.

Tabla No. 3.22b
MUESTRA DE GEL DE XANTANA ADICIONADO CON IONES FIERRO AL 1.0%
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN CREEP
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
K_0'	0.1200	0.2211	0.1200	MPa ⁻¹
K_1'	0.0108	0.0099	0.0110	MPa ⁻¹ s ⁻¹
K_2'	0.9000	2.1564	0.7728	MPa ⁻¹
K_3'	0.9588	0.9795	0.9718	MPa

Los parámetros reológicos obtenidos con los tres programas son muy semejantes entre sí, sin embargo si existe cierta diferencia la cual puede verse de una manera gráfica al observar las curvas calculadas generadas con los tres programas las cuales aunque se encuentran muy cerca entre ellas y su tendencia es un poco diferente (Curva generada con curve Expert), en general podría deducirse que los tres programas describen de una manera adecuada el comportamiento reológico de la muestra de gel de goma Xantana

adicionado con 1.0% de iones fierro cuando se usa el modelo de Burger simplificado (Función Creep).

Figura No. 3.12
MUESTRA 4
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCULADA
(FUNCIÓN CREEP)

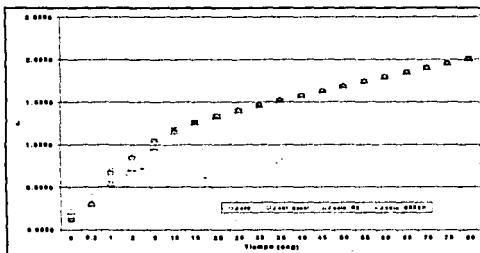


Tabla 3.23b
MUESTRA GEL DE GOMA XANTANA ADICIONADO CON IONES FIERRO AL 1.0%
COMPARACIÓN DE LOS PROGRAMAS

	*PVAD J experimental Y J calculada		
	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP
1 ELEMENTO KELVIN	0.228	0.000	0.228
2 ELEMENTOS KELVIN	0.020	—	0.017
FUNCIÓN CREEP	0.061	0.041	0.064

*PROMEDIO DEL VALOR ABSOLUTO DE LA DIFERENCIA ENTRE J experimental Y J calculada

En la tabla anterior donde se muestran los promedios de la diferencia entre J experimental y J calculada con cada uno de los tres programas y para las tres modelos usados en el análisis, se puede observar que el modelo de Burger con 2 elementos Kelvin, fue el que presentó un menor promedio en la diferencia, seguido del modelo simplificado de Burger.

D) PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE BURGER A LA DEFORMACIÓN TOTAL EN LA CURVA DE CREEP

En la Tabla No. 3.24b, se muestra como contribuye cada elemento del modelo de Burger a la deformación total en la muestra de gel de goma Santana adicionado con iones de fierro al 1.0%.

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

Tabla No. 3.24b
MUESTRA GEL DE GOMA XANTANA ADICIONADO CON IONES PIERRO AL 1.0%
CONTRIBUCIÓN DE CADA ELEMENTO A LA DEFORMACIÓN TOTAL

ELEMENTO	PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN
J_0	100.00
J_0	5.96
J_{00}	56.44
J_v	36.49
J_p	7.06
J_k	57.54
J_{k0}	50.48

En esta tabla se muestra que la deformación elástica instantánea (J_0) contribuye a la deformación total con un 5.96%, y la deformación puramente viscosa (J_v) contribuye con un 36.49%, mientras que la deformación retardada (J_k) que caracteriza al elemento Kelvin es la que más contribuye con un 57.54% de los cuales la deformación elástica del elemento Kelvin (J_{k0}) representa el 50.48% contra solo el 7.06% que aporta la deformación viscosa del elemento Kelvin (J_p). Valores que indican que el comportamiento reológico del gel de goma Xantana adicionado con 1.0% de iones Fe^{+} está ampliamente caracterizado por un comportamiento elástico. El porcentaje de J_{00} es la suma de los elementos elástico instantáneo (J_0) y la deformación retardada (J_k).

MUESTRA No. 5 (mousse)

Finalmente la última muestra que se utilizó para la prueba del programa CREEP, se trata de una muestra de mousse (postre) preparada en el laboratorio, la cual fue sometida a una prueba de compresión de Creep en un equipo diseñado y construido en el laboratorio de Propiedades Funcionales y Reológicas de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM. Como es de suponerse para esta muestra no se tienen bases de comparación, ya que no se conoce su comportamiento reológico, únicamente se parte de los datos obtenidos experimentalmente.

A) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 1 ELEMENTO KELVIN

Los datos experimentales de tiempo Vs Compliance (J experimental) se analizaron con los tres programas utilizando el modelo de Burger con un elemento Kelvin, los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla No. 3.25b.

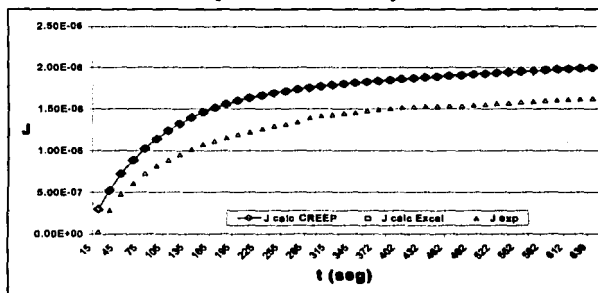
Tabla No. 3.25b
MUESTRA DE MOUSSE
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP
(1 ELEMENTO KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	2.6230E-08	-----	2.6230E-08	Mpa ⁻¹
η_N	1948297524.1742	-----	1902611229.1664	MPa*s ⁻¹
J_1	1.5969E-06	-----	1.6562E-6	MPa*s
T_1	86.6943	-----	86.6961	s
η_1	54287994.2247	-----	52347787.5645	MPa*s

Tal como lo muestra la tabla anterior, CURVE EXPERT no fue capaz de obtener los parámetros de Creep con 1 elemento Kelvin. En este caso cabe señalar que la precisión del programa CREEP, no permite visualizar claramente el valor de algunos de los parámetros, esto se debe principalmente a que ellos son muy pequeños y el programa fue diseñado para mostrar los resultados con 4 cifras significativas que para este caso resultan ser insuficientes, sin embargo el valor de J_1 puede calcularse manualmente usando la relación $J_1 = \eta_1/\eta_1$. Otro hecho importante que es necesario resaltar, es la diferencia considerable que existe entre los parámetros que si se pueden visualizar con Excel y con CREEP (η_N y η_1), esto se debe a la diferencia de cifras significativas con las que trabajan ambos programas y a las operaciones aritméticas que son requeridas para obtenerlos.

A pesar de las diferencias señaladas anteriormente entre CREEP y Excel, puede observarse que las curvas generadas con ambos programas, están casi sobrepuestas la una con la otra.

Figura No. 3.13
MUESTRA DE MOUSSE
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCADA
(1 ELEMENTO KELVIN)



B) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP CON 2 ELEMENTOS KELVIN

La serie de datos de tiempo Vs J experimental fue analizada utilizando los tres programas y el modelo de Burger con dos elementos Kelvin. Los resultados obtenidos con los tres programas se muestran en la Tabla No: 3.26b.

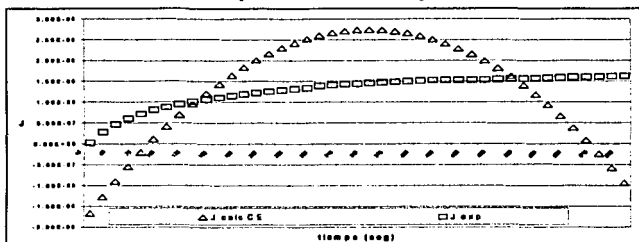
Tabla No. 3.26b
MUESTRA DE MOUSSE
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CREEP (2 ELEMENTOS KELVIN)
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
J_0	-----	-2.0831e-6	-----	Mpa ⁻¹
$1/\eta N$	-----	0.00237	-----	MPa*s ⁻¹
J_1	-----	34400.4750	-----	MPa*s
T_1	-----	-29059048.0000	-----	s
VISC. 1	-----	-845.6002	-----	MPa*s
J_2	-----	34398.1790	-----	MPa*s
T_2	-----	-29058472.0000	-----	s
VISC. 2	-----	-849.7677	-----	MPa*s

Como se observa en la tabla anterior, los programas Excel y CREEP, no pudieron obtener los parámetros de Creep con dos elementos Kelvin, no así CURVE EXPERT que sí pudo obtener dichos parámetros, sin embargo debe observarse que los tiempos de retardo 1 y 2 (T_1 y T_2) son valores negativos, lo que físicamente no tiene ningún significado válido, por lo que se puede concluir que estos resultados no son correctos.

Aunque Curve Expert es el único programa que puede realizar el cálculo con dos elementos Kelvin, debe notarse que gráficamente la tendencia entre J calculada y J experimental son completamente diferentes por lo que puede afirmarse que este programa no describe adecuadamente el comportamiento reológico de la muestra de mousse cuando se usa el modelo de Burger con 2 elementos kelvin.

Figura No. 3.14
MUESTRA DE MOUSSE
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCADA
(2 ELEMENTOS KELVIN)



C) CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CREEP USANDO LA FUNCIÓN CREEP

Los datos experimentales de la prueba de Creep de la muestra de mousse fueron analizados con los tres programas utilizando el modelo simplificado de Burger "Función Creep", los resultados se muestran en la Tabla No. 3.27b.

Tabla No. 3.27b
MUESTRA DE MOUSSE
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN CREEP
OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES PROGRAMAS

PARÁMETRO	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP	UNIDADES
K_0	2.6230E-8	8.0426e-7	0.0000	MPa ⁻¹
K_1	5.2560E-10	1.4374e-9	0.0000	MPa*s ⁻¹
K_2	5.5825E+7	-587001.7400	5.5817E+7	MPa ⁻¹
K_3	6.7601E+5	26996.4150	6.7591E+5	Mpa

En la tabla anterior puede observarse que el valor de los parámetros K_1 y K_2 son demasiado pequeños, por lo que para este caso el programa CREEP tampoco pudo mostrar dichos parámetros debida a la precisión con la que fue diseñado. Además de que en este caso aunque los parámetros que sí pudo mostrar el programa CREEP, poseen la misma tendencia que los mostrados por Excel, estos no son iguales,

Figura No. 3.15
MUESTRA DE MOUSSE
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCADA
(FUNCIÓN CREEP)

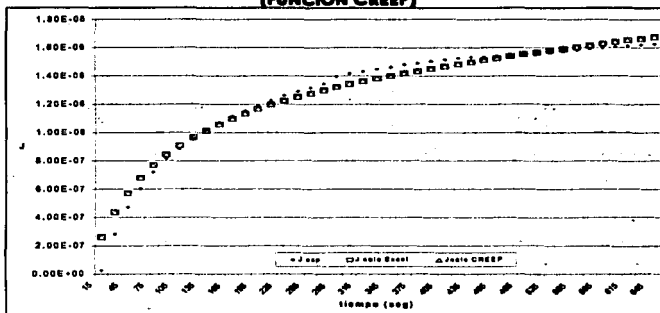
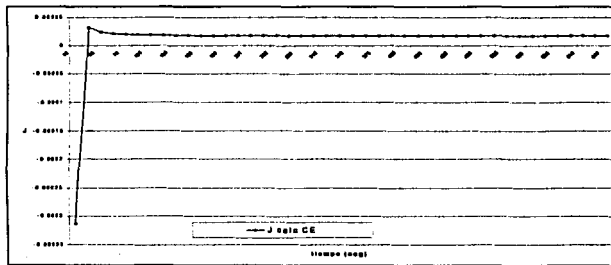


Figura No. 3.16
MUESTRA DE MOUSSE
GRÁFICA COMPARATIVA DE J EXPERIMENTAL Vs J CALCAD
(FUNCIÓN CREEP)
PROGRAMA CURVE EXPERT



Al observar la figura anterior (Figura No. 3.16), se puede ver claramente que la tendencia de la curva generada con el programa CURVE EXPERT cuando se usa el modelo de Burger con 2 elementos Kelvin para realizar el análisis esta no se parece en lo absoluto en la forma característica de una curva de Creep. Con esto se puede afirmar que este programa no describe adecuadamente el comportamiento reológico de la muestra de mousse.

Tabla 3.28b
MUESTRA DE MOUSSE
COMPARACIÓN DE LOS PROGRAMAS

	*PVAD J experimental Y J calculada		
	EXCEL	CURVE EXPERT	CREEP
1 ELEMENTO KELVIN	3.20 X 10-7	-----	3.16 X10-7
2 ELEMENTOS KELVIN	-----	9.60 X10-7	-----
FUNCION CREEP	4.40 X10-8	2.337 X10-5	4.40 X10-8

*PROMEDIO DEL VALOR ABSOLUTO DE LA DIFERENCIA ENTRE J experimental Y J calculada

Todos los valores del promedio de la diferencia entre J experimental y J calculada con los tres programas en los casos en los que estos pudieron realizar los cálculos, son muy pequeños, es decir en el orden de 10^{-8} o menor aún, sin embargo, esto no asegura que todos describan de manera adecuada el comportamiento reológico de la muestra de mousse. Para ver cual fue el programa que mejor describió este comportamiento, es necesario observar cada uno de los gráficos (Figuras 3.13 a 3.16) de las cuales se deduce que los programas que dan brindan un mejor resultado son el programa Excel y el programa CURVE EXPERT cuando se basan los cálculos en el modelo de Burger con 1 elemento Kelvin, ya que el resto de las curvas de J calculada obtenidas presentan una tendencia diferente a la de la curva experimental.

D) PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE BURGER A LA DEFORMACIÓN TOTAL EN LA CURVA DE CREEP

Para concluir la prueba del programa CREEP se obtiene el porcentaje de contribución de cada elemento del modelo de Burger a la deformación total, resultados que son mostrados en la Tabla No. 3.29b.

Tabla No. 3.29b
MUESTRA DE MOUSSE
CONTRIBUCIÓN DE CADA ELEMENTO A LA DEFORMACIÓN TOTAL

ELEMENTO	PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN
J_1	100.00
J_2	1.61
J_{2p}	79.96
J_v	10.19
J_r	9.85
J_h	88.20
J_{2r}	78.35

Para entender un poco como se desarrolla el comportamiento reológico de la muestra de mousse, puede hacerse referencia al porcentaje de contribución de cada elemento en el

modelo de Burger a la deformación total (Tabla No. 3.29b), en donde se observa que la deformación elástica instantánea (J_0) solamente contribuye con un 1.61%, es decir que se necesita muy poco esfuerzo para que la muestra comience a deformarse, el elemento que caracteriza a la deformación puramente viscosa (J_v) contribuye con 10.19%, pero en mayor porcentaje se encuentra el elemento retardado (J_e) que caracteriza al elemento Kelvin con un 88.20% del los cuales el 78.35% corresponde a la deformación elástica del elemento Kelvin (J_{ev}) y el 9.85% a la deformación viscosa del elemento Kelvin, dando un carácter más elástico a la muestra. El porcentaje de J_{e0} es la suma de los elementos elástico instantáneo (J_0) y la deformación retardada (J_e).

COMPARACIÓN DEL TIEMPO QUE SE INVIERTE EN CADA UNO DE LOS PROGRAMAS PARA OBTENER LOS RESULTADOS.

En la Tabla No. 3.30b se muestra la relación de tiempo aproximado que se requiere para alimentar los datos al programa y obtener los resultados. Antes de observar dicha tabla debe ser considerado lo siguiente.

1.- Para efectuar el análisis de datos se empleó una computadora con las siguientes características principales:

- a) Procesador AMD K6 II a 500 Mhz.
- b) Memoria RAM DE 64 MB.

Por lo que estos tiempos pueden variar de una manera considerable si se usa un equipo de características diferentes.

2.- El tiempo que se empleó para el análisis de datos con el programa Excel, es un tiempo relativo, ya que este depende en gran medida de la habilidad que tenga cada usuario y de sus conocimientos en el manejo de este programa para diseñar la hoja de cálculo, debido a que no es lo mismo que sea utilizado por una persona que posea unos conocimientos deficientes en su uso, porque esta tardaría demasiado tiempo en obtener los resultados.

3.- El tiempo que se consideró en Excel para obtener los resultados abarca desde que han sido alimentados los datos a la hoja de cálculo, el diseño de la hoja de trabajo hasta que ya se tiene el valor de los porcentajes de diferencia de cada muestra con los valores experimentales.

4.- El tiempo que se requiere para alimentar los datos a cada programa es considerado alimentando cada uno de los datos desde teclado, aunque los tres programas cuentan con la opción de leer los datos desde un archivo, y debe considerarse que este tiempo

también es influenciado por la habilidad con que cuenta el usuario para capturar los datos. Para este caso en particular es válido considerar que el usuario cuenta con un nivel de conocimientos para introducir los datos y diseñar las hojas de cálculo en Excel que va de intermedio a avanzado, lo cual permitió reducir de manera considerable el tiempo en estas actividades.

Tabla No. 3.30b
COMPARACIÓN DEL TIEMPO EMPLEADO EN CADA PROGRAMA
PARA INGRESAR LOS DATOS* Y OBTENER LOS RESULTADOS.

		MUESTRA				
		1	2	3	4	5
INGRESO DE DATOS	EXCEL	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos
	C. E.	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos
	CREEP	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos	10- 20 minutos
OBTENCIÓN DE RESULTADOS	EXCEL	10-30 minutos	10-30 minutos	10-30 minutos	10-30 minutos	10-30 minutos
	C. E.	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto
	CREEP	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto

*Considerando que los datos no se encuentran en un archivo y se alimentan desde el teclado.

De acuerdo a los datos mostrados en la tabla anterior, puede observarse que el programa CREEP y CURVE EXPERT son los que emplean menos tiempo para obtener los resultados, mientras que Excel requiere de un tiempo considerablemente mayor. Tomando en cuenta que en la mayoría de las muestras, tanto Excel con CREEP obtienen los mismos resultados resulta más conveniente utilizar el programa CREEP para realizar un análisis de datos de pruebas de creep en donde se utilicen cualquiera de los tres métodos empleados en este trabajo. Tomando en cuenta que en muchos de los casos CURVE EXPERT no pudo obtener resultados satisfactorios y aunque este programa presenta una gran rapidez para el análisis de datos, su uso no siempre resulta conveniente.

RESUMEN DE LA PRUEBA DEL PROGRAMA CREEP

Los aspectos más importantes de la prueba del programa CREEP son resumidos en los siguientes puntos:

- En la mayoría de los casos, los resultados obtenidos con CREEP son iguales a los obtenidos con Excel.
- Aunque CURVE EXPERT obtuvo resultados los cuales describían fielmente la curva de Creep, en muchos casos los parámetros carecían de significado físico real.

- En algunos de los casos CURVE EXPERT fue incapaz de obtener resultados, y en otros casos donde si logró hacerlo, estos no siempre tuvieron un significado físico real.
- Una limitante del programa CREEP, es el manejo de cifras significativas, pero esto puede ser solucionado al realizar ciertas modificaciones al programa para que este presente resultados con mayor número de cifras significativas cuando así sea requerido. Estas modificaciones ya se encuentran en proceso. Otra alternativa mientras se cuenta con el programa ya modificado es usar conversiones de unidades las cuales permitan trabajar con números más grandes.
- El tiempo necesario para ingresar los datos al programa CREEP y el tiempo en el cual este arroja los resultados es considerablemente menor al tiempo necesario para adaptar la hoja de cálculo en Excel y para obtener los resultados en cada caso.
- En Excel es necesario adaptar una hoja de cálculo para cada problema, lo que conlleva a una considerable inversión de tiempo.

Es necesario recalcar que el trabajar con programas como CURVE EXPERT y otros programas comerciales basados en iteraciones y regresiones no lineales, en muchas ocasiones, aún cuando los parámetros describen bien el comportamiento de los datos experimentales, dando un buen ajuste no siempre es posible relacionarlos con el comportamiento del material, ni utilizarlo para la comparación de efectos de formulación, proceso, etc., en el comportamiento reológico de un material. En cuanto a los resultados obtenidos en CREEP y Excel al estar basados en un método gráfico relacionado con cada uno de los elementos del modelo de Burger, los parámetros obtenidos tienen un claro significado físico. Una alternativa para resolver esta limitante de los programas matemáticos como CURVE EXPERT es usarlos como complemento al programa CREEP, es decir, una vez que se cuenta con una aproximación de los parámetros calculados con CREEP, estos se alimentan al programa CURVE EXPERT y con ello se obtienen parámetros que proporcionan un mejor ajuste de los datos experimentales a los modelos empleados.

Unos ejemplos de la forma en que son reportados los parámetros de Creep son los que se obtienen con el programa que acompaña al REÓMETRO PHYSICA modelo MC1 el cual con el software RS120 solo reporta los parámetros del modelo Maxwell y cuando se usa el programa US 2000 no se obtiene ningún parámetro reológico. El modelo LS 100 con el programa LS 100 calcula los parámetros del modelo Kelvin generalizado con 1 y 2 elementos Kelvin sin embargo este programa presenta los mismos problemas que el programa CURVE EXPERT y solo puede realizar el análisis con datos obtenidos con el mismo equipo.

Cuando se usa un REÓMETRO HAAKE con el programa RHEOWIN solamente se obtienen los parámetros J_0 , J_{e0} , γ_{e0} , y η_0 , pero ningún parámetro que describe la zona de retardo, con esto quiere señalarse que ni aún los programas que acompañan a los equipos de análisis son capaces de calcular todos los parámetros necesarios para describir el comportamiento reológico en especial de un material alimenticio, por lo que se hace necesario el diseño de programas adaptados a los requerimientos que se tengan.

El programa CREEP está limitado a un cierto número de datos dentro de la serie de compliance contra tiempo (99 datos), esto se debe a que el incluir más puntos dentro de la curva de Creep hace más complicada la clara visualización de su tendencia y sobre todo de determinar en que punto se localiza el cambio entre la fase viscosa y la fase retardada de la curva.

Por todos estos puntos señalados anteriormente, es válido concluir que el programa CREEP es una excelente opción para llevar a cabo el análisis de datos de pruebas de CREEP.

CONCLUSIONES

El diseño de programas específicos para cada problema, tal como los dos que se resuelven en esta tesis, en la mayoría de los casos describen de una manera muy adecuada el comportamiento reológico de las muestras en comparación con aquellos programas en los cuales se pueden ajustar datos experimentales a modelos que el programa ya incluye o que uno puede ingresar al mismo, ya que los programas específicamente diseñados como CREEP, toman en cuenta todos los puntos necesarios para resolverlos.

En el caso del programa TEXTURA, éste resulta de gran utilidad dado que reduce considerablemente el tiempo de cálculo de los parámetros de dureza en pruebas de penetración, que aunque el realizar estos cálculos no es complicado, si resulta muy laborioso por la gran cantidad de operaciones aritméticas que se deben realizar, y la gran cantidad de fórmulas trigonométricas que son empleadas.

Con lo que respecta al programa CREEP, es importante mencionar que los programas matemáticos basados en iteraciones y regresiones no lineales, generalmente piden que el usuario ingrese valores aproximados de las constantes de los modelos matemáticos, mismas que generalmente se desconocen. Al no tener estos valores pueden presentarse los siguientes casos:

- El tiempo necesario para realizar el cálculo sea bastante largo.
- No se pueda realizar el cálculo.
- Haga el cálculo y de un buen ajuste pero con valores de los parámetros carentes de significado físico o relación con el fenómeno.
- Los parámetros obtenidos no den un buen ajuste.

El programa Creep siempre arroja resultados que son relacionados con el fenómeno, aunque en ocasiones el ajuste no es muy bueno pero los datos calculados muestran una tendencia similar a los experimentales.

Los parámetros obtenidos con CREEP pueden utilizarse para alimentar los datos preliminares de las constantes del modelo en CURVE EXPERT u otros programas similares y de esta manera obtener un mejor ajuste con valores de las constantes relacionadas con el modelo en estudio.

En relación a los objetivos planteados en este trabajo, estos fueron cumplidos completamente, ya que los dos programas diseñados además de realizar los cálculos

de una manera eficiente, el tiempo necesario para obtener los resultados se reduce considerablemente en comparación al tiempo necesario para diseñar una hoja de cálculo y obtener los resultados en Excel. Esta ventaja se tiene cuando se usan los dos programas (TEXTURA y CREEP). En comparación con el programa CURVE EXPERT el tiempo empleado para obtener los resultados en ambos programas es muy similar, sin embargo debe considerarse que este último no siempre presenta los resultados con un significado físico real, por lo que se tiene que hacer uso de otro programa. Considerando esto, CREEP se convierte en una buena opción para obtener los parámetros del modelo de Burger con 1 y 2 elementos Kelvin y el modelo simplificado de Burger (Función Creep) en un corto tiempo y con un buen ajuste de los resultados. Si es necesario mejorar el ajuste se hace una recomendación al usuario de complementar los resultados del programa CREEP con un programa matemático como CURVE EXPERT.

Es conveniente mencionar que ambos programas actualmente son usados en el laboratorio con buenos resultados. Los usuarios no han reportado problemas ni en el uso de los programas ni en los resultados obtenidos.













Actualmente se está trabajando en disminuir las limitaciones de ambos programas en cuanto al número de cifras significativas. Se está evaluando la posibilidad de rediseñar ambos programas en un lenguaje con ambiente gráfico como Visual Basic o Visual C lenguajes que presentarán la ventaja de la presentación de los gráficos con una mejor calidad.

**ANEXO I
NOMENCLATURA USADA EN FÓRMULAS**

Símbolo	Definición	Unidades
DISPOSITIVOS DE PENETRACIÓN (CONO 45°)		
α	Ángulo	grados
R_1	Radio	cm
R	Radio Truncación del cono de 45°	cm
H	Altura	cm
G	Generatriz	cm
B	Altura de truncación	cm
A	Área	cm ²
M	Peso	g
CONO DE 15°		
β	Ángulo	grados
R	Radio	cm
G	Generatriz	cm
l	Altura	cm
A_1	Área	cm ²
AGUJA		
θ	Ángulo	grados
R	Radio	cm
G	Generatriz	cm
l	Altura parte cónica	cm
A	Área parte cónica	cm ²
M	Peso	g
PRUEBAS DE DUREZA		
D	Dureza	Dinas/cm ²
m_T	Peso total del dispositivo	g
A	Área total del dispositivo	cm ²
a_0	Aceleración de la gravedad	cm/s ²
L	Lectura en la carátula del dispositivo	cm
g_1	Generatriz del cono	cm
r_1	Radio del cono	cm
PRUEBAS DE FLUENCIA O DE CREEP		
τ	Esfuerzo	N/m ²
E	Módulo de elasticidad o Módulo de Young en la ley de Hooke	N ² /m ²
γ	Deformación	s ⁻¹
η_0	Viscosidad newtoniana	MPa*s
G	Módulo de Rigidez o Módulo de Coulomb	N ² /m ²
t	Tiempo	s
γ_0	amplitud de la deformación	s
Jr	Relación Deformación - esfuerzo retardada	MPa ⁻¹
JN	Relación Deformación - esfuerzo newtoniana	MPa ⁻¹
E0	Módulo de Elasticidad Instantánea	MPa
J	Compliance	MPa ⁻¹

J_0	Compliance Instantáneo	MPa ⁻¹
T	Tiempo de retardo	s
Q	Diferencia entre el valor de J obtenido de la extrapolación de la parte recta de la curva de Creep a un tiempo t y el valor de J obtenido experimentalmente en el mismo tiempo t.	MPa ⁻¹
K	Constante	adimensional
K_0	Equivalente a J_0	MPa ⁻¹
K_1	Equivalente a J_1	MPa*s ⁻¹
K_2	Ordenada al origen en la curva linealizada de la Función Creep	MPa ⁻¹
K_3	Pendiente en la curva linealizada de la función Creep.	MPa
φ	Función Creep	MPa ⁻¹
Ln	Logaritmo Natural	adimensional

ANEXO II
SIMBOLOGÍA DE DIAGRAMAS DE FLUJO

	Inicio - Fin	Indica el inicio o el final de un Diagrama de Flujo
	Proceso	Indica una operación o cálculo
	Decisión	Indica que el flujo del diagrama puede seguir más de un camino, este depende del resultado de la expresión lógica.
	Display (monitor)	Indica que un mensaje será mostrado en la pantalla de la computadora
	Entrada o Salida de datos	Indica que la computadora recibirá o mostrará datos del o al usuario por cualquier medio (monitor, impresora, teclado, etc). Para diferenciar si es de entrada o de salida, se usa la letra E o S según el caso.
	Conector en la misma página	Indica la unión de dos secciones de un diagrama, cuando estas se encuentran en la misma página, se debe usar un símbolo, o carácter para identificar que secciones serán enlazadas.
	Conector de página	Se usa para enlazar dos secciones de un diagrama de flujo que se encuentren ubicadas en diferentes páginas, se usa un símbolo o carácter para identificar las secciones que serán enlazadas
	Líneas de Flujo	Indican la dirección que sigue el flujo del diagrama
	Entrada o salida de datos por medio de disco magnético	Indica que la información será almacenada o leída por medio de un disco magnético
	Salida de datos por medio de impresora.	Indica que los datos o información serán desplegadas por medio de una impresora.
	Subproceso	Indica que se ejecutará un proceso predefinido
	Ciclo	Indica que una operación o conjunto de operaciones se repetirá "n", número de veces

BIBLIOGRAFÍA

1. "A Basic Introduction to Rheology"; (1994); BOHLIN Instruments L.T.D.; Gloucestershire GL7 1YJ; England.
2. Bourne M. C., 1982 "Food Texture and Viscosity, Concept and Measurement"; Food Science and Technology A Series of Monographs; Academic Press; N. Y., EUA.
3. Brown W. E., 1969, "Testing of Polymers", 4, John Wiley, Ed. Interscience Publishers, N.Y. USA.
4. Casas A. N. B., Ramírez O. M. E.; 1997; Curso de Superación Académica, Medición de Textura en Alimentos con Máquina Universal de Deformación (Texturómetro); Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán U.N.A.M.
5. Deman J. M., Voisey P. W., Rasper V. F. and Stanley D. W. 1974; Rheology and Texture in Food Quality; The AVI Publishing Co.
6. Farina V. M.; 1970; Diagramas de Flujo.; Ed. Diana; México.
7. Fiszman S. M., Costell F., Duran L.; 1983, Medida del Comportamiento Reológico de los Alimentos sólidos II. Métodos Fundamentales; Rev. Agroquímica y Tecnología de Alimentos 23(3) p. 303 - 307.
8. Gaspar R. A.; 1993; "Reología su Instrumentación y Aplicación"; Juan A. Salazar Montoya y Emma G. Ramos Ramírez Editores; Centro Tomás de México S. A. de C. V. PARA PHYSICA EUA.
9. Glicksman M. 1969; Gum Technology in the Food Industry; Academic Press Inc. N. Y.; EUA.
10. González G. C.; 1991; Control de Calidad; Mc Graw Hill; México.
11. Johnson E. A., Segars, R.A., Kapsalis J. G.; 1980; "Evaluation of the Compressive Deformatibility Modulus of Fresh and Cooked Fish Flesh"; Journal of Food Sci., 45 p. 1318 - 1320.
12. Kamata Y. Rector D, Kinsella J. E.; 1988; Effects of Temperature on Creep Phenomena of Soybean Glycerin Gels; Journal of Food Sci.; 53(2), p. 589-591.
13. Kamata Y. Rector D. , Kinsella J. E.; 1989; A Comparison of Creep Phenomena in food Protein Gels; 54(1) p. 170-172.

14. Katsuta K. and Kinsella J. E.; 1990; Effects of Temperature on Viscoelastic Properties and Activation Energies of Whey Protein Gels.; *Journal of Food Sci.*; 55(5), p. 1296-1302.
15. Katsuta K., Rector D. and Kinsella. J. E.; 1990; Viscoelastic Properties of Whey Protein Gels: Mechanical Model and Effects of Protein Concentration on Creep; *Journal of Food Sci.*; 55(2), p. 516 -521.
16. Kitabatake N., Shimizu A., and Doi E.; 1989; Comparison of Transparent Gels with turbid Gels Prepared from Egg White: Creep Analysis of Gels; *Journal of Food Sci.*; 54; p.1209-1212.
17. Konstance R. P. and Holsinger V. H. 1992; Development of Rheological Test Methods for Cheese; *Food Tech.*; (1) 1992. p 105 - 109.
18. López R. L.; 1998; "Programación Estructurada en Turbo Pascal 7"; Computec, Ed. Alfa Omega; México.
19. Ma. L. and G. V. Barbosa-Cánovas: 1997; "Viscoelastic Properties of Xanthan Gels Interacting with Carions" *Journal of Food Sci.*; 62(6); p.1124-1128.
20. Merger T.; 1994: A Little Course in Rheology - Rotation; 1991; *Physica*.
21. Pedrero F. Daniel L., y Pangborn Rose M.; 1989: Evaluación Sensorial de los Alimentos, Métodos Analíticos; Ed. Alhambra Mexicana; México: p. 92.
22. Peleg, M.; 1977: "The Role of the Specimen Dimensions in Uniaxial Compression of Food Materials"; *Journal Of Food Sci.*; 42(3). p. 649 - 651.
23. Peleg, M. and Calzada J.F.; 1976: "Stress Relaxation of Deformed Fruits and Vegetables"; *Journal of Food Sci.*, 41, p. 1325 - 1329.
24. Purkayastha S., Peleg M., Jhonson E. A., and Normand M. D.: 1985; A Computer Aided Characterization of the Compressive Creep Behavior of Potato and Cheddar Cheese. ; *Journal of Food Sci.*; 50; 1985.
25. Rao, V. N. M.; 1983; Description and Measurement of Viscoelastic Properties of Solid Food En "Viscoelastic Properties of Foods", Ed. Elsevier Applied Science; N. Y. p. 3-25.
26. Steffe J. F.; 1992; "Rheological Methods in Food Process Engineering"; Freeman Press; Michigan, EUA.
27. Shoemaker F. Charles, Nonts J. Bonnans Sophia and Nobbla C. ANN; 1992: Rheological Characterization of Dairy Products: *Food Tech.*; (1) p. 98-104.

28. Szczesniak A. S.; 1962: **Objective Measurements of Food Texture**; Technical Center, General Foods Corporation; N. Y. p. 410 - 419.
29. Vernon E. J., Lower C. A., y Torreblanca A.: 1970; **Estudio de las propiedades Viscoelásticas de Productos Alimenticios**; Tecnología de Alimentos México; XVIII (2) p. 11-17.
30. Yester M.; 1989; **"Turbo Pascal Manual de Bolsillo"**; Addison-Wesley Iberoamérica; EUA.