

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**MANUAL DE REOLOGIA PARA EL LABORATORIO  
EXPERIMENTAL MULTIDISCIPLINARIO I**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :**

**INGENIERA EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A :**

**DULCE ANGELICA ADAN PALOMARES**

**A S E S O R : M. EN C. MARIA GUADALUPE SOSA HERRERA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U.N.  
UNIDAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
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:

Manual de Reología para Laboratorio Experimental Multidisciplinario 1.

que presenta la pasante: Dulce Angélica Adán Palomares  
con número de cuenta: 09507386-6 para obtener el título de:  
Ingeniera en Alimentos

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 31 de Octubre de 2007.

PRESIDENTE

IBQ. Norma B. Casas Alencaster

*Norma B. Casas Alencaster*

VOCAL

Dra. Laura Patricia Martínez Padilla

*Laura Patricia Martínez Padilla*

SECRETARIO

MC. María Guadalupe Sosa Herrera

*María Guadalupe Sosa Herrera*

PRIMER SUPLENTE

MC. María Eugenia Ramírez Ortiz

*María Eugenia Ramírez Ortiz*

SEGUNDO SUPLENTE

MC. Virginia A. Delgado Reyes

*Virginia Delgado Reyes*

Gracias,

**A Dios.**

Por brindarme la vida y permitirme lograr los objetivos que me he trazado desde el momento que tuve huso de conciencia y razón.

**A mi madre, en su memoria.**

Que con tanto cariño, esfuerzo y desvelo hizo de mí una persona de provecho y que me ha dejado la mejor herencia del mundo como es una carrera.

**A mi esposo.**

Que siempre me ha brindado su apoyo incondicional y me ha alentado para seguir adelante.

**A mis hermanas.**

Que siempre han estado a mi lado apoyándome y brindándome su amistad.

**A mis amigos.**

Por sus consejos, apoyo y su amistad incondicional.

**A mis maestros.**

Por su paciencia y confianza.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>CONTENIDO</b>	<b>I</b>
<b>CUADROS</b>	<b>IV</b>
<b>FIGURAS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS</b>	<b>5</b>
1.1 Variables involucradas en la evaluación del comportamiento reológico	6
1.1.1 Esfuerzo	6
1.1.2 Deformación	10
1.1.3 Velocidad de cizalla	11
1.1.4 Tiempo	13
<b>CAPÍTULO 2. CLASIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO</b>	<b>16</b>
2.1 Clasificación de los materiales	17
2.2 Materiales sólidos	19
2.2.1 Módulo elástico	20
2.3 Materiales Fluidos	22
2.3.1 Fluido newtoniano	23
2.3.2 Fluidos no newtonianos	26
A) Fluidificantes por cizalla o reofluidizantes	26
B) Espesantes por cizalla o reoespesantes	29

## ÍNDICE

C) Plásticos	29
2.4 Modelos matemáticos para los fluidos no-newtonianos	37
2.5 Materiales fluidos y su relación con la estructura	46
<b>CAPÍTULO 3. VISCOELASTICIDAD</b>	<b>51</b>
3.1 Viscoelasticidad	52
3.1.1 Viscoelasticidad lineal	52
3.2 Métodos experimentales de medida	53
3.2.1 Métodos estáticos	53
3.2.2 Pruebas dinámicas	57
3.3 Modelos mecánicos de viscoelásticidad lineal	65
<b>CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS MATERIALES</b>	<b>69</b>
4.1 Instrumentos reológicos	70
4.1.1 Viscosímetro capilar o de tipo tubo	71
A) Viscosímetro de Ostwald	73
4.1.2 Reómetros y viscosímetros rotacionales	75
A) Cilindros concéntricos	77
B) Cono y placa	80
C) Placas paralelas	82
D) Sistemas de medición no convencionales	87
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>90</b>

# ÍNDICE

<b>ANEXO A</b>	<b>VIII</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>X</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>XIV</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1.1	Número de Déborah	14
2.1	Velocidades de cizalla típicas de operaciones industriales y aplicación de productos	27
2.2	Ecuaciones empíricas para explicar el comportamiento reológico de materiales.	39
2.3	Parámetros reológicos para fluidos	41
4.1	Volúmenes requeridos en los sensores de cono y placa	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1.1	Esfuerzos típicos sobre un material	7
1.2	Representación de esfuerzos	9
1.3	Tipos de esfuerzos que se aplican a los materiales	9
1.4	Deformación producida por (a) esfuerzo de tensión y (b) esfuerzo de cizalla	10
1.5	Perfil de velocidades producido cuando un fluido es cizallado entre placas paralelas	12
2.1	Comportamiento reológico de los materiales	19
2.2	Modelo mecánico del sólido elástico	20
2.3	Compresión uniaxial de una muestra cilíndrica	21
2.4	Modelo mecánico del líquido viscoso	22
2.5	Curvas de flujo	27
2.6	Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para varios alimentos con carácter de líquido.	28
2.7	Fluidos plásticos A, B y C.	31
	a) Esfuerzo de cizallamiento en función de la velocidad de cizalla.	
	b) Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla.	
2.8	Esfuerzo de fluencia estático y dinámico.	33
2.9	Curva de fluidos no newtonianos de propiedades dependientes del tiempo de cizallamiento.	35
2.10	La anti-tixotropía es un fenómeno inverso a la tixotropía	37
2.11	Líquidos refluidizantes dependientes de la velocidad de cizalla	40
2.12	Fenómeno de retroceso en fluidos viscosos y viscoelásticos	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
2.13	Efecto de hinchamiento	43
2.14	Efectos de vórtice a la salida de un recipiente	44
2.15	Efecto de sifón	46
2.16	Efecto Weissenberg	47
2.17	Cualidades de las estructuras - relaciones reológicas en estructuras multifacéticas de fluidos	48
3.1	Curvas de relajación de esfuerzos	54
3.2	Curvas idealizadas del fluencia	56
3.3	Prueba dinámica: esfuerzo impuesto y deformación obtenida de un sólido	58
3.4	Prueba dinámica: esfuerzo de cizalla y deformación obtenida de un líquido newtoniano	58
3.5	Respuesta típica a un barrido de deformación mostrando la región viscoelástica lineal	60
3.6	Ejemplo de un espectro mecánico de una sustancia de bajo peso molecular	62
3.7	Espectro mecánico de sustancias de alto peso molecular	63
3.8	Espectro mecánico de sustancias con redes esterificadas	64
3.9	Cuerpo sólido viscoelástico (Kelvin-Voigt)	66
3.10	Cuerpo líquido viscoelástico (Maxwell)	66
3.11	Cuerpo viscoelástico (Burgers)	68
4.1	Representación esquemática del viscosímetro de Ostwald	72
4.2	Representación esquemática de reómetros. Control computarizado de esfuerzo y temperatura estandarizada.	76
4.3	Dispositivos rotacionales	76
4.4	Geometría de cilindros concéntricos	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
4.5	Sensor de cono y placa	80
4.6	Geometría de placas paralelas.	83
4.7	Geometría de cono y placa con cono truncado	84
4.8	Doble espacio anular	86
4.9	Helicoidal, cilindro y geometría de paletas con dimensiones geométricas similares	87

## RESUMEN

El presente documento comprende una revisión bibliográfica orientada a resumir la información que cubra las necesidades conceptuales sobre reología, de los estudiantes del Laboratorio Experimental Multidisciplinario I de la carrera de Ingeniería en Alimentos, que contribuya a su vez a un mayor entendimiento de los orígenes físicos de la viscosidad, la elasticidad y la viscoelasticidad, así como su relación con el comportamiento de los sistemas alimenticios.

Para tal efecto el documento se dividió en cuatro capítulos, introduciendo en el Capítulo I los conceptos básicos fundamentales como esfuerzo de cizalla, deformación y velocidad de cizalla. Posteriormente, se incluye en el Capítulo II la clasificación del comportamiento reológico diferenciando entre materiales sólidos y líquidos, particularizando a su vez, entre líquidos newtonianos y no newtonianos incluyendo algunos modelos reológicos que suelen ser más comunes en alimentos. Dadas las características de la gran mayoría de los sistemas alimenticios, se consideró relevante la integración del Capítulo III sobre viscoelasticidad el cual comprende tanto su definición como los métodos que existen para su caracterización. Finalmente, en el Capítulo IV se resume la información de los instrumentos convencionales utilizados en la caracterización de materiales alimenticios, particularmente, aquellos con los que se cuenta en el LEM 1 como son viscosímetro rotacional, reómetro y capilar en U.

## INTRODUCCIÓN

Los alimentos, además de ofrecer un olor, un color y un sabor característicos, exhiben determinado comportamiento mecánico: reaccionan de un cierto modo cuando intentamos deformarlos. Pueden ser duros o blandos, correosos, quebradizos o gomosos; de textura uniforme o fibrosa, entre otros. Unos fluyen fácilmente, otros con dificultad. Para expresar o estimar su comportamiento mecánico, existen dos procedimientos; uno de ellos consiste en tocar, estrujar, morder o masticar el alimento y describir las sensaciones recogidas: método sensorial (fisiológico/psicológico). Las apreciaciones de este tipo varían ampliamente con el individuo que las efectúa, por lo que es preciso someterlas a un tratamiento estadístico. El segundo grupo de procedimientos de evaluación que es el tema que se desarrollará en este documento utiliza métodos físicos; el valor apreciado no depende, en este caso, del individuo que efectúa la medición, la cual se realiza instrumentalmente; estos métodos suelen ser considerados como “objetivos”. Al estudio físico del comportamiento mecánico de los materiales se le denomina Reología, que actualmente se define como la ciencia de la deformación y flujo de la materia (Lapasin y Pricl, 1992, Muller, 1973).

Existen razones fundamentales para justificar el estudio del comportamiento reológico de los alimentos, particularmente en el caso de los polisacáridos y proteínas que los componen. En primer lugar, contribuye al conocimiento de su estructura; por ejemplo, existe cierta relación entre el tamaño y la forma molecular de las sustancias en disolución y su viscosidad, así como entre el grado de entrecruzamiento de los hidrocoloides y su elasticidad. En segundo lugar en la industria de alimentos se efectúan con frecuencia medidas reológicas sobre las materias primas y los productos en elaboración, que son de gran utilidad para el control de los procesos. En tercer lugar, la reología presta una valiosa ayuda al diseño de las máquinas; es preciso que tolvas, tuberías y bombas se adecúen a las características de los productos con los que van a ser utilizadas. Los ingenieros juegan siempre con un margen, o factor de seguridad, que mejor sería denominar “factor de ignorancia” y que cuesta dinero por lo que cuanto mejor se conozca la reología del producto a transportar, más eficaces serán las maquinarias empleadas, particularmente en el caso de los alimentos que suelen ser estructuralmente complejos. Finalmente, sus

características reológicas influyen de un modo considerable en la aceptación de un producto por los consumidores. Como ejemplos tenemos la extensibilidad de la margarina y la viscosidad de los batidos entre otros. Por tales razones el estudio de las propiedades reológicas de polisacáridos y proteínas así como su efecto en diferentes sistemas alimenticios complejos es uno de los objetivos principales que persigue el Laboratorio Experimental Multidisciplinario I (LEM I) de la carrera de Ingeniería en Alimentos.

La clasificación reológica, principalmente en el área de alimentos se dificulta debido a que está constituida por la enorme diversidad de materiales existentes: los hay sólidos, líquidos y con propiedades reológicas intermedias. ¿Cómo se pueden clasificar reológicamente productos tan diversos como, en el mundo de los alimentos, la leche, la mayonesa, las cremas de queso y la miga de pan? Un segundo problema deriva del distinto comportamiento que cualquier producto ofrece al variar las condiciones en que se observa. Que un cuerpo se comporte como un sólido o como un líquido depende de la magnitud del esfuerzo que se le aplique y el tiempo de observación. Otra complicación al que se enfrenta el estudiante de LEM I son las deficiencias en el dominio de temas tales como transferencia de cantidad de movimiento y flujo de fluidos que están estrechamente relacionadas con la reología y que son clave para entender el significado y la importancia de conceptos básicos, aunado a esto cabe destacar que la gran mayoría de la información sobre reología se encuentra publicada en idioma extranjero, generalmente en inglés, lo cual es otro factor que dificulta la comprensión del tema, por la falta de dominio del idioma y a veces por la mala calidad de traducciones al español con los que cuenta el alumno. Existen textos básicos que suelen consultar los estudiantes, pero que no cubren todos los aspectos de reología necesarios, a veces por concentrarse el tema en un solo capítulo o por la antigüedad de los mismos; en el otro extremo, existen documentos que si bien contemplan una amplia revisión del tema, también suelen ser muy especializados para el nivel estudiantil.

Con base en lo anterior se planteó como objetivo hacer una recopilación de información de diversas fuentes para poder proporcionar al estudiante de Ingeniería en Alimentos, particularmente del LEM I, información básica resumida que contribuya a un mejor

entendimiento sobre reología. La ruta a seguir es introducir los conceptos clave a través de ideas y ejemplos que son familiares a los Ingenieros en Alimentos.

Para cubrir tal objetivo se procuró consultar textos de reología fundamentales, sencillos de entender y preferentemente relacionadas con alimentos, algunas de ellos son: Rao, 1999; Steffe, 1996; Windhab, 1995; Rao y Steffe, 1992; entre otros. Se consultaron también algunos textos que son más especializados o con un nivel técnico superior, que sirvieron para profundizar un poco más en temas que se consideró necesario, y comprender mejor algunos conceptos, dentro de éstos se encuentran: Barnes, 1989 y Ferry, 1980; Morrison y Ross, 2002. Para complementar algunos temas, se recurrió, también a artículos, tales como: Rao y Steffe, 1997, Ma. y Barbosa-Cánovas, 1995, Dealy, 1995, entre otros. Aunado a una búsqueda vía internet cuyas citas están indicadas y se encuentran enlistadas al final de las referencias bibliográficas.

**CAPÍTULO 1**  
**CONCEPTOS BÁSICOS**

## 1.1 VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

El estudio de las propiedades mecánicas de los materiales se efectúa a través de pruebas fundamentales que emplean técnicas reológicas cuya aplicabilidad es en algunos casos discutible por cuestiones prácticas, pero que permiten obtener resultados de valor universal. De estas pruebas fundamentales se obtienen las funciones materiales, es decir, aquellas que sólo dependen del material y no del instrumento ni el método empleado. En estas pruebas los resultados se expresan en términos de potencias de masa, longitud y tiempo y todas las variables son conocidas y controladas, de tal forma que la prueba pierde validez si no se controlan aspectos como la homogeneidad, el manejo y el tratamiento mecánico previo de la muestra (Bourne, 1982; Rosenthal, 2001). Para evaluar el comportamiento reológico de los materiales debe controlarse alguna de las variables involucradas (esfuerzo o deformación) y medir la otra en función del tiempo. Si se trata de pruebas fundamentales, los esfuerzos y deformaciones deben estar perfectamente definidos y ser los mismos en toda la muestra.

### 1.1.1 Esfuerzo

La fuerza,  $F$ , es una cantidad física cuya acción altera el estado de reposo o de movimiento de un cuerpo, o bien, su forma y dimensiones. Es decir, provoca un cambio de dimensión de un elemento, respecto de su dimensión inicial. Es un vector que para quedar perfectamente especificado en un sistema tridimensional requiere de tres cantidades (tensor de primer orden o de orden cero): magnitud, dirección y sentido. Las fuerzas que actúan sobre un elemento de materia pueden ser de dos tipos. Las del primer tipo surgen en el seno del material y son proporcionales a la masa de la sustancia (por ejemplo gravedad, fuerza centrífuga, fuerza magnética). Estas fuerzas se conocen como fuerzas másicas y se miden en unidades de fuerza por unidad de volumen. Las del segundo tipo se conocen como fuerzas de superficie ( $F$ ) que actúan sobre la superficie del cuerpo, éstas se denominan esfuerzos. El esfuerzo,  $\sigma$ , es la respuesta de un material bajo la acción de una fuerza, cuya intensidad depende del área sobre la cual actúa, por lo que queda expresado como una fuerza por unidad de área ( $A$ ) (Ecuación 1.1), usualmente se expresa en Pascales ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) (Steffe, 1996).

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

A diferencia de un vector, el esfuerzo,  $\sigma$ , es un tensor de segundo grado que requiere ser especificado por la magnitud de la fuerza, la dirección de la fuerza y el plano de acción. De tal forma que la dirección se fija en relación a un sistema de coordenadas y se caracteriza por la descomposición de la fuerza en tres componentes (Figura 1.1), uno normal y dos en el plano de la superficie del punto sobre el cual la fuerza actúa. El primero da como resultado los esfuerzos normales y los otros dos, esfuerzos tangenciales llamados esfuerzos de cizalla o de corte (Figura 1.2). Los esfuerzos normales son considerados positivos cuando actúan hacia afuera, provocando un esfuerzo de tensión, y negativos cuando actúan hacia adentro, es decir, creando un esfuerzo de compresión (Rao y Steffe, 1992). Por lo tanto, en un sistema tridimensional el esfuerzo debe estar constituido por nueve componentes para que quede completamente definido.

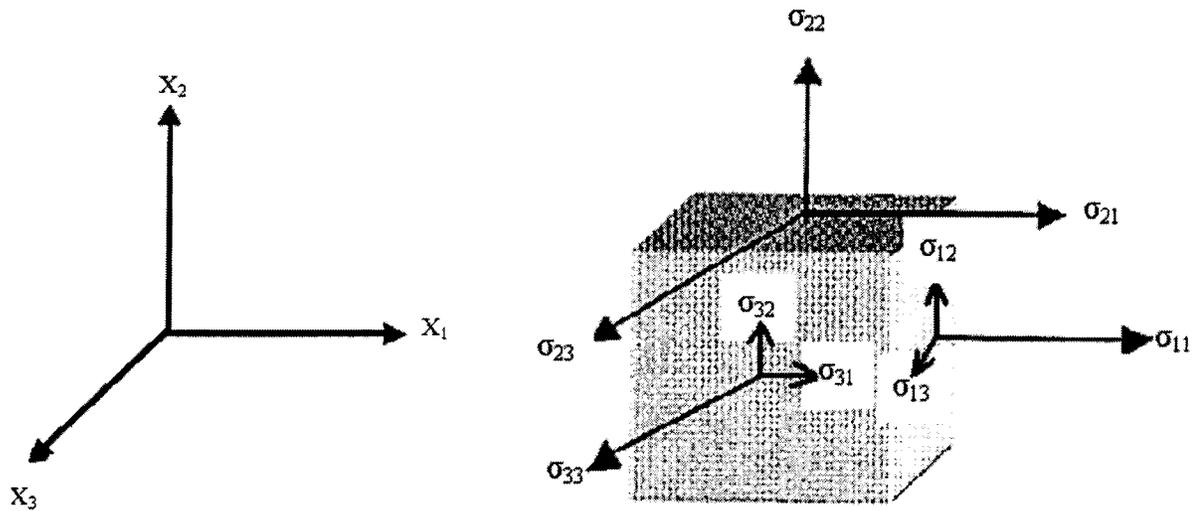


Figura. 1.1 Esfuerzos típicos sobre un material (Rao y Steffe, 1996).

En un sistema de coordenadas cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) aplicado sobre un elemento (Figura 1.1), el esfuerzo se indica como  $\sigma_{ij}$ , donde el primer subíndice se refiere a la orientación de la cara sobre la cual actúa la fuerza y el segundo subíndice se refiere a la dirección de la fuerza. De esta forma,  $\sigma_{11}$  es un esfuerzo normal actuando en el plano perpendicular a  $x$  en la dirección de  $x$  y  $\sigma_{21}$  es un esfuerzo de cizalla actuando en el plano perpendicular a  $y$ , en la dirección de

x. Los componentes del esfuerzo se pueden resumir como un tensor de esfuerzo escrito en forma de matriz de orden tres (nueve componentes):

$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

En la diagonal principal ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ ) tenemos los esfuerzos normales, los cuales son perpendiculares a la superficie donde se aplican estos esfuerzos la deformación ocurre en una sola dirección. Los demás son esfuerzos de cizalla paralelos a la superficie, se aplican en una dirección y la deformación se da en más de una dirección (Steffe, 1996).

Bajo condiciones de equilibrio la matriz es simétrica, por lo tanto hay sólo 6 componentes independientes en el tensor de esfuerzos (Ecuación 1.2), por lo que la matriz se reduce a

$$\sigma_{12} = \sigma_{21}, \quad \sigma_{31} = \sigma_{13} \quad \text{y} \quad \sigma_{32} = \sigma_{23}.$$

En el caso de cizalla o corte simple (flujo viscométrico)  $\sigma_{13}$  y  $\sigma_{23}$  son cero, como sucede en el caso de cilindros concéntricos, cono y placa y placa-placa. Por lo que el esfuerzo total en el fluido queda descrito por  $\sigma_{21}$ , el esfuerzo de cizalla y los esfuerzos normales:

$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22}$  Primera diferencia de esfuerzos normales (presión contra el cono o cilindro)

$N_2 = \sigma_{22} - \sigma_{33}$  Segunda diferencia de esfuerzos normales (variación de presión a través del espacio anular, como función del radio).

El origen de estos esfuerzos puede ser muy diverso; por ejemplo, el calentamiento no uniforme de un material produce una distribución de esfuerzos dentro del mismo, o la deformación misma de un cuerpo genera otros esfuerzos. Sin embargo, aunque las causas que los produzcan sean variadas, los esfuerzos se pueden clasificar en dos grandes grupos: normales y de cizalla (Figura 1.2). Si los esfuerzos resultan de aplicar fuerzas perpendiculares a la unidad de área del material se llaman normales, y dependiendo del sentido de esta fuerza respecto a la superficie, a su vez se clasifican en tensión o de compresión (Figura 1.3 a y b). Si en cualquier punto de un material los esfuerzos son normales y de compresión, como ocurre en el caso de un objeto en reposo y totalmente sumergido en un fluido, a este esfuerzo

se le llama presión hidrostática (Figura 1.3c) o simplemente presión la cual es un ejemplo de esfuerzo intuitivo (Rosenthal, 2001; Steffe, 1996).

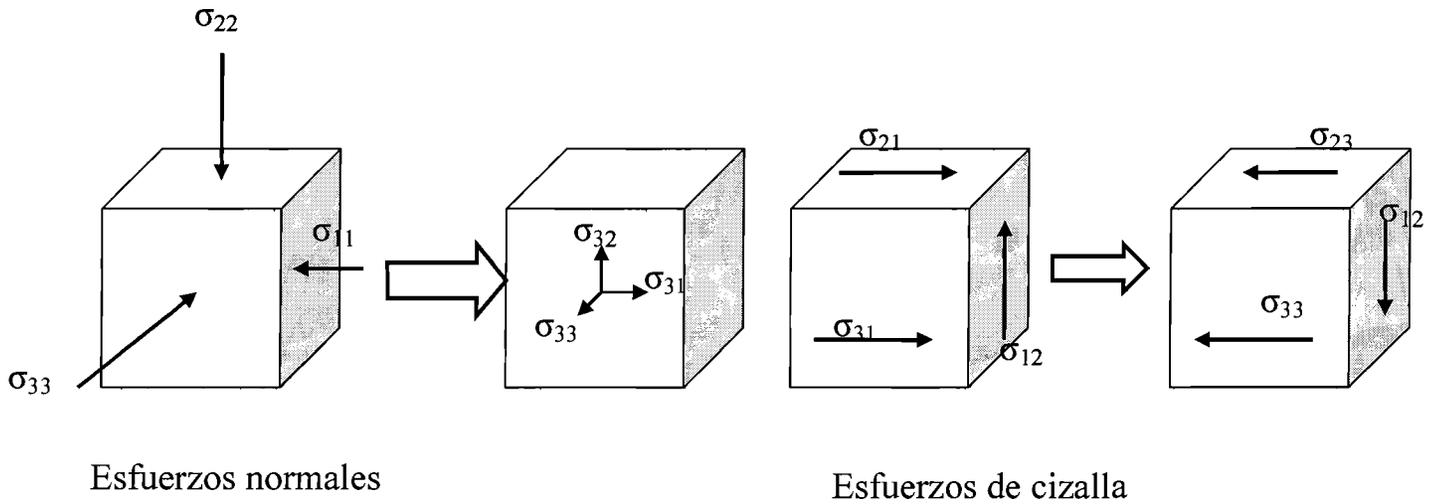


Figura. 1.2 Representación de esfuerzos (Adaptado de Rao y Steffe, 1996).

Por otra parte, los esfuerzos de cizalla resultan de aplicar fuerzas paralelas y contenidas en el plano de la unidad de área de material. En una barra sólida estos esfuerzos se producen al torcer la barra alrededor de su eje longitudinal, como si se apretara un tornillo. En cambio, en un fluido los esfuerzos de cizalla o de corte se producen, por ejemplo, al deslizar una superficie sobre un líquido lubricante, o cuando líquidos y gases resbalan por una superficie sólida o fluyen por un tubo, o cuando un objeto se mueve en el seno de un fluido, como ocurre durante el paso de un avión a través del aire.

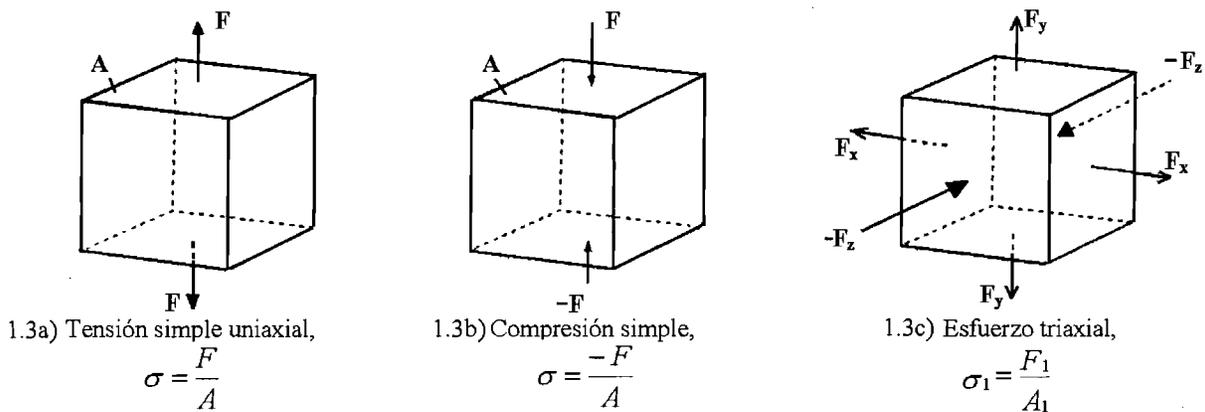


Figura. 1.3 Tipos de esfuerzo que se aplican a los materiales (Rosenthal, 2001).

### 1.1.2 Deformación

La deformación es el cambio relativo de dimensión o forma de un cuerpo sujeto a un esfuerzo. La deformación es de esta manera la reacción inducida de un esfuerzo. Existen diferentes tipos de deformación correspondientes a los diferentes tipos de esfuerzos (cizalla, compresión, extensión). Si un esfuerzo normal de tensión se aplica a una barra de longitud  $L_0$  (Figura 1.4a), éste produce una extensión de tal forma que la longitud final de la barra será  $L = L_0 + \delta L$ . La deformación producida en la barra se expresa como la deformación de Cauchy,  $\varepsilon_c$  (Ibarz y col., 2005):

$$\varepsilon_c = \frac{\delta L}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (1.3)$$

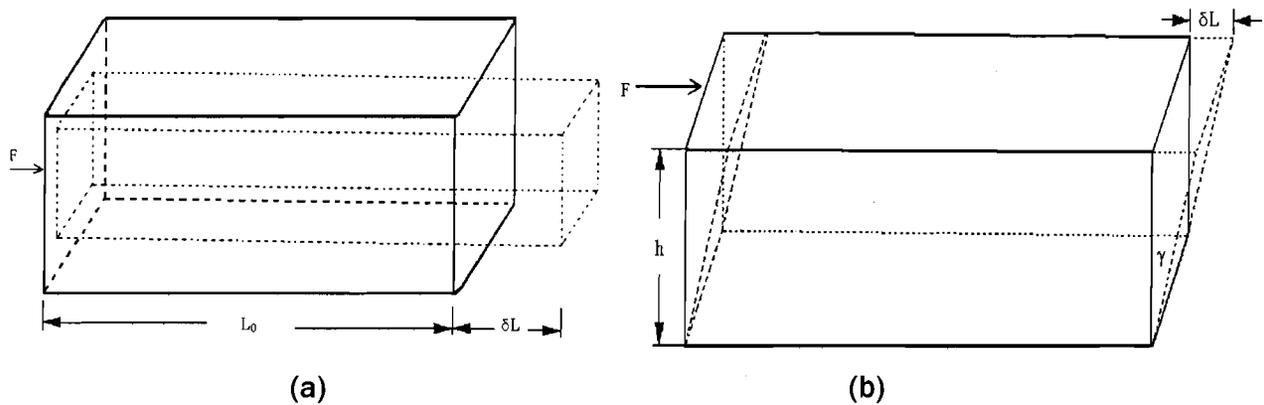


Figura 1.4 Deformación producida por (a) esfuerzo de tensión y (b) esfuerzo de cizalla (Steffe, 1996)

Para deformaciones altas es preferible el uso de la deformación de Hencky,  $\varepsilon_H$ , definida como:

$$\varepsilon_H = \ln \frac{L}{L_0} \quad (1.4)$$

Cuando un esfuerzo de cizalla se aplica, éste produce una deformación como se muestra en la Figura 1.4b, donde la parte inferior del cuerpo permanece estacionaria. El ángulo de cizalla se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$\tan \gamma = \frac{\delta L}{L} \quad (1.5)$$

Para deformaciones pequeñas, donde  $\tan \gamma \approx \gamma$ , la tangente del ángulo de deformación se considera igual a la deformación de cizalla,  $\gamma$  (Ibarz y col., 2005).

La deformación es también un tensor de segundo orden, por lo tanto posee nueve componentes escalares. De hecho, cada esfuerzo tiene una deformación correspondiente orientada bajo los mismos subíndices (Tecante, 2005).

$$\sigma = \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \epsilon_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \epsilon_{33} \end{vmatrix} \quad (1.6)$$

### 1.1.3 Velocidad de cizalla

Cuando se estudia la aplicación de un esfuerzo sobre un sistema fluido, se produce movimiento hasta que el esfuerzo se retira. Idealmente, esto se puede ejemplificar usando dos placas paralelas conteniendo un fluido en el espacio entre ellas, como se ilustra en la Figura 1.5 (Goodwing y Hughes, 2000). Un esfuerzo de cizalla constante se debe mantener sobre la placa superior para que se mueva a una velocidad constante,  $u$ , mientras la placa inferior permanece fija. Asumiendo que no existe deslizamiento entre la superficie de la placa y el fluido, se considera que existe un continuo cambio de velocidad a través del pequeño espacio entre las placas, disminuyendo hasta cero en la superficie inferior. De esta forma, en cada segundo el desplazamiento producido es  $x$  y la deformación es:

$$\gamma = \frac{x}{y} \quad (1.7)$$

y conforme  $u = \frac{dx}{dt}$  se puede escribir la velocidad de cizalla como:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{u}{y} \quad (1.8)$$

Para espacios grandes, la velocidad de deformación puede variar a través del espacio, de tal forma que se puede escribir:

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} \quad (1.9)$$

El punto sobre la gamma ( $\dot{\gamma}$ ) indica que la velocidad de cizalla es la derivada con respecto al tiempo de la deformación causada por el esfuerzo de cizalla,

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dx}{dy} \frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dy} \frac{du}{dy} = \frac{du}{dy} \quad (1.10)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{m/s}{m} = \frac{1}{s} = [s^{-1}] \quad (1.11)$$

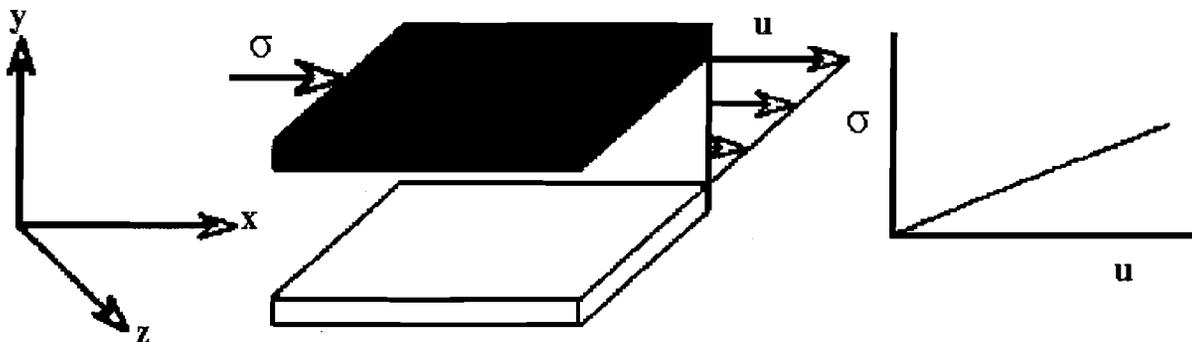


Figura. 1.5. Perfil de velocidades producido cuando un fluido es cizallado entre placas paralelas (Goodwin y Hughes, 2000).

Los términos velocidad de deformación, velocidad de corte, gradiente de velocidad y velocidad de cizalla suelen ser empleados indistintamente como sinónimos (Goodwing y Hughes, 2000). Sin embargo, para ser consistentes y facilitar la lectura y el entendimiento del texto, en este documento se le designará como velocidad de cizalla, con base en los términos propuestos por la Red Iberoamericana de Propiedades Físicas de Alimentos para el Diseño Industrial (RIPFADI) del programa Iberoamericano CYTED (Aguilera y Durán-Hidalgo, 1996).

En los experimentos de elasticidad sólo se considera la magnitud de la deformación ( $\gamma$ ), mientras que en los de viscosidad se determina la magnitud de la deformación dividida por el tiempo que ésta tarda en producirse; en otras palabras, la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ). Esto simplemente significa que los sólidos son deformados, mientras que los líquidos fluyen (Schramm, 1994).

Dependiendo del tipo de flujo que se genere, la deformación puede ser de cizalla o extensional. Cuando un flujo causa una extensión del líquido, la resistencia a este movimiento surge de una viscosidad extensional. El flujo extensional requiere de una aceleración del fluido conforme éste se hace menos espeso, esto nunca se alcanza en un flujo estacionario. Algunas aplicaciones prácticas involucran flujo extensional, frecuentemente con un componente de cizalla. Como ejemplos en la industria de alimentos se encuentran los productos atomizados (“sprays”) y los untables (Goodwing y Hughes, 2000).

#### 1.1.4 Tiempo

La clasificación del comportamiento reológico de los materiales relacionada con su respuesta a los esfuerzos aplicados debe ser extendida más allá por la introducción de la escala del tiempo en el proceso de deformación. La escala de tiempo en reología está dada por el número adimensional de Deborah,  $De$ . El cual fue definido por el Profesor Marcus Reiner con la idea de que “todo fluye si se espera el tiempo suficiente, incluso las montañas!” (Barnes y col., 1989).

$$De = \frac{\lambda}{t} \quad (1.12)$$

Lo anterior se refiere a conocer el tiempo de respuesta característico del material,  $\lambda$ , que puede definirse como el tiempo requerido para que un material fluya. En los sólidos elásticos ideales, el tiempo característico es infinito y en los fluidos viscoelásticos puede ser  $10^{-2}$  s. Por

otro lado se tiene el tiempo experimental,  $t$ , que se refiere al tiempo que está bajo nuestro control durante el proceso de deformación. Por lo tanto, la respuesta de un material dependerá de su tiempo característico y del tiempo experimental.

Considerando una pieza de material en la cual todas las moléculas o partículas han tenido tiempo para alcanzar algún estado de baja energía, que es instantáneamente deformada, se estará almacenando energía debido a que la estructura es perturbada y las moléculas están ahora en un estado de mayor energía. Conforme el tiempo transcurre, se vuelve más fácil mantener esta deformación porque las moléculas se difunden hasta alcanzar un estado de menor energía, equivalente al estado inicial, aunque la forma original se haya perdido, es decir, aunque haya ocurrido flujo viscoso. Se puede definir el tiempo que este proceso requiere para que ocurra como el tiempo de relajación de esfuerzo,  $\lambda$ , característico del material (Goodwin y Hughes, 2000).

Para líquidos, los tiempos de relajación observados son muy pequeños (por ejemplo alrededor de  $10^{-13}$  s para agua), mientras que para los materiales elásticos,  $\lambda$  es muy grande. Para materiales viscoelásticos,  $\lambda$  es intermedia (alrededor de  $10^{-1}$  a  $10^{-6}$  s) y corresponde aproximadamente a las escalas de tiempo humanas (Van Vliet, 2001).

Esto indica que la relación entre el tiempo de relajación y el tiempo de escala característico de la observación es importante para el comportamiento reológico observado del material. El comportamiento reológico de materiales con un tiempo de relajación único se puede clasificar de acuerdo al número de Déborah del siguiente modo:

Cuadro 1.1 Número de Déborah (Goodwin y Hughes, 2000).

De $\ll 1$	Se trata de un líquido
De $\gg 1$	Se trata de un sólido
De $\sim 1$	Se trata de un material viscoelástico

Los vidrios de una catedral de Francia, producidos hace 600 años, tienen un espesor mucho mayor en la parte inferior que en la superior, lo que supone que las moléculas han fluido con el paso del tiempo por efecto de la gravedad. El altísimo valor del tiempo experimental,  $t$ , de este proceso, da lugar a un número De muy pequeño para un sólido como el vidrio.

Lo anterior ilustra como el tiempo experimental puede tener gran influencia en los resultados de las mediciones reológicas y es fundamental conocer los tiempos de respuesta del material

para establecer condiciones experimentales apropiadas a lo que se desea evaluar (Schramm, 1994).

La mayoría de los alimentos son materiales compuestos, conteniendo varios elementos estructurales conectados por varios enlaces. Como resultado, estos productos no se pueden caracterizar por un  $\lambda$ , más bien es necesario un espectro de  $\lambda$  para describir su comportamiento a la relajación. No obstante en la práctica, muchos materiales elásticos exhiben un comportamiento viscoso más fuerte en escalas de tiempo cortas. Sin embargo el panorama puede ser más complicado (Van Vliet, 2001).

**CAPÍTULO 2**  
**CLASIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO**

## 2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Existen diferentes criterios para establecer la clasificación de los materiales con base en su comportamiento reológico, a continuación se presentan clasificaciones que nos servirán para entender las características de cada comportamiento. La manera más general de clasificar el comportamiento de los materiales los divide en tres categorías, estas son (García-Rejón, 1981):

Sólido de Hooke, materiales que obedecen la Ley de Hooke

Materiales viscoelásticos

Fluido newtoniano, materiales obedecen la Ley de Newton

Tanto el comportamiento sólido de Hooke como el comportamiento fluido newtoniano, son casos ideales, pero muchos de los sistemas alimenticios se encuentran entre estos dos y quedan incluidos dentro del comportamiento viscoelástico.

Aunque ya desde 1678 el científico inglés Robert Hooke había establecido que para una gran variedad de materiales sólidos la deformación elástica producida es proporcional al esfuerzo aplicado, no fue sino hasta 1775 cuando el matemático suizo Leonhard Euler propuso la primera relación constitutiva para un fluido, el llamado fluido perfecto o ideal, éste es un fluido cuya fricción interna o viscosidad es estrictamente nula y que, además, tiene la siguiente propiedad: el esfuerzo que una parte del fluido ejerce sobre las partes adyacentes es normal; es decir, siempre es perpendicular a la superficie que separa ambas partes. Cualquier fluido real es viscoso en alguna medida y, sólo en forma aproximada, cuando su densidad es muy baja, se comporta como un fluido ideal. Por ejemplo, el helio a temperaturas muy bajas puede comportarse como el fluido ideal de Euler, con una viscosidad exactamente igual a cero (<http://omega.ilce.edu.mx>).

La siguiente, es también una forma general de clasificación, pero en ésta se consideran más a detalle los comportamientos de los materiales al someterse a un esfuerzo (García-Rejón, 1981).

**A) Fluidos**

- Inelásticos independientes del tiempo
- Inelásticos dependientes del tiempo
- Viscoelásticos

**B) Plásticos****C) Sólidos**

- Elástico recuperación instantánea
- Viscoelástico recuperación retardada

Una clasificación más particular para los distintos materiales se presenta en la Figura 2.1, en ésta se hace una clara distinción entre materiales sólidos y líquidos (fluidos). Sin embargo, existen materiales, tales como los alimentos que presentan un comportamiento intermedio y que necesitan estar bien caracterizados, por lo que una clasificación más específica se desglosa en el esquema mencionado. Los fluidos son inicialmente clasificados como aquellos que poseen comportamiento newtoniano o no newtoniano, dependiendo de si pueden ser descritos por la ley de Newton o no. Los fluidos no-newtonianos son también clasificados como dependientes e independientes del tiempo. Aquéllos en los cuales el comportamiento reológico depende sólo del esfuerzo o la velocidad de cizalla (a temperatura constante) son considerados independientes del tiempo. Los fluidos dependientes del tiempo son aquéllos en los cuales la viscosidad depende no sólo de la velocidad o el esfuerzo de cizalla, sino también del tiempo que la velocidad o esfuerzo de cizalla es aplicado al fluido. Existen fluidos que presentan ambos, comportamiento sólido y comportamiento líquido, son llamados viscoelásticos (Ibarz y col., 2005).

Para caracterizar el comportamiento al flujo se suele recurrir al empleo de modelos matemáticos que expresan con una ecuación la relación entre el esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) y la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ). Algunos de ellos también se encuentran mencionados dentro de la Figura 2.1. A continuación se describen más a detalle cada uno de los comportamientos mencionados.

## 2.2 MATERIALES SÓLIDOS

El sólido es un material que se deforma bajo la aplicación de un esfuerzo, hasta que alcanza una deformación total, la cual no aumenta mientras el esfuerzo se aplica. Cuando el esfuerzo es removido, el material regresa a su configuración inicial. La elasticidad de un material es descrita por la ley de Hooke (*ut tensio sic vis* o la extensión es proporcional a la fuerza) (Morrison y Ross, 2002). El sólido se representa por medio de un resorte, Figura 2.2. Este modelo muestra que cuando al resorte se le aplica una fuerza, la máxima deformación de acuerdo con la rigidez del material se alcanza instantáneamente y cuando la fuerza se retira, el material recupera total e instantáneamente su estado inicial.

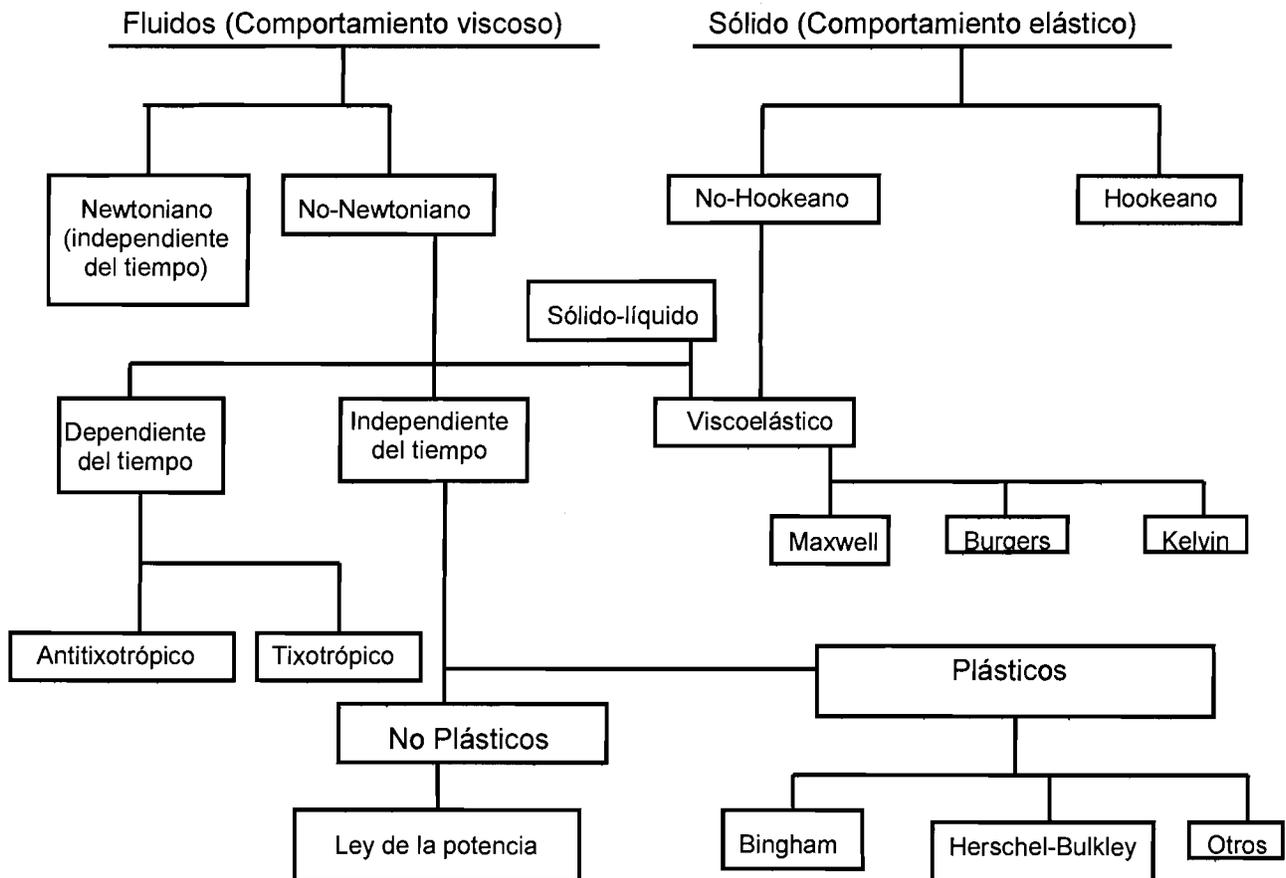


Figura 2.1 Comportamiento reológico de los materiales (Steffe, 1996).

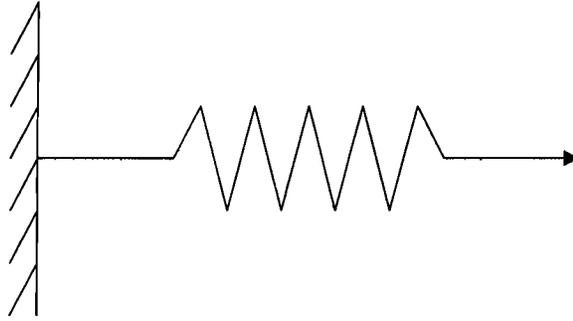


Figura 2.2 Modelo mecánico del sólido elástico (Rao y Steffe, 1992).

### 2.2.1 Módulo elástico

El módulo elástico se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación, y dependiendo de la manera en que se aplica el esfuerzo, se pueden calcular tres tipos de módulo para un sólido de Hooke (Tecante, 2005):

- 1) Cuando la fuerza es perpendicular al área, la relación resultante es conocida como el módulo de elasticidad o módulo de Young,  $E$ , algunas veces  $Y$ . Éste es una medida de la rigidez o dureza del material.

$$E = \frac{\sigma_{ii}}{\epsilon_{ii}} \quad (2.1)$$

En la ecuación 2.1 los subíndices  $ii$  indican los componentes normales del esfuerzo y la deformación, tales como 11, 22 y 33 en los arreglos (1.2) y (1.6).

- 2) Cuando la fuerza es paralela al área, la relación es conocida como módulo de rigidez o módulo de cizalla,  $G$ . Éste cuantifica la resistencia del material a cambiar en forma.

$$G = \frac{\sigma_{ij}}{\gamma_{ij}} \quad (2.2)$$

En esta ecuación, (2.2), los subíndices  $ij$  indican los componentes de cizalla del esfuerzo y la deformación.

3) Cuando la misma fuerza normal se aplica en todas direcciones, isotrópicamente, es decir, que se ejerce con igual intensidad en todas direcciones, la relación se conoce como módulo de volumen,  $K$ , el cual mide la resistencia de un material a cambiar en volumen.

$$K = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} \quad (2.3)$$

En la ecuación 2.3 el subíndice  $v$  se emplea para indicar que el esfuerzo y la deformación son cantidades de volumen, esto es, se refieren al cambio en volumen de un material y la correspondiente resistencia a tal cambio.

La ley de Hooke puede utilizarse para describir el comportamiento de muchos productos sólidos (cascarón de huevo, pasta seca y dulces duros, entre otros) cuando son sometidos a pequeñas deformaciones, normalmente menores que 0.01. Mayores deformaciones frecuentemente producen fracturas o comportamientos no lineales (Steffe, 1996).

Otro factor importante es el llamado índice de Poisson,  $\nu$ , Cuando una barra esta sometida a una carga de tracción simple se produce en ella un aumento de longitud en la dirección de la carga, así como una disminución de las dimensiones laterales perpendiculares a esta (Figura 2.3). La relación entre la deformación en la dirección lateral y la de la dirección axial se define como relación de Poisson (ecuación 2.4).

$$\nu = \frac{\frac{\delta R}{R_0}}{\frac{\delta h}{h_0}} \quad (2.4)$$

$\nu$  = deformación lateral / deformación axial

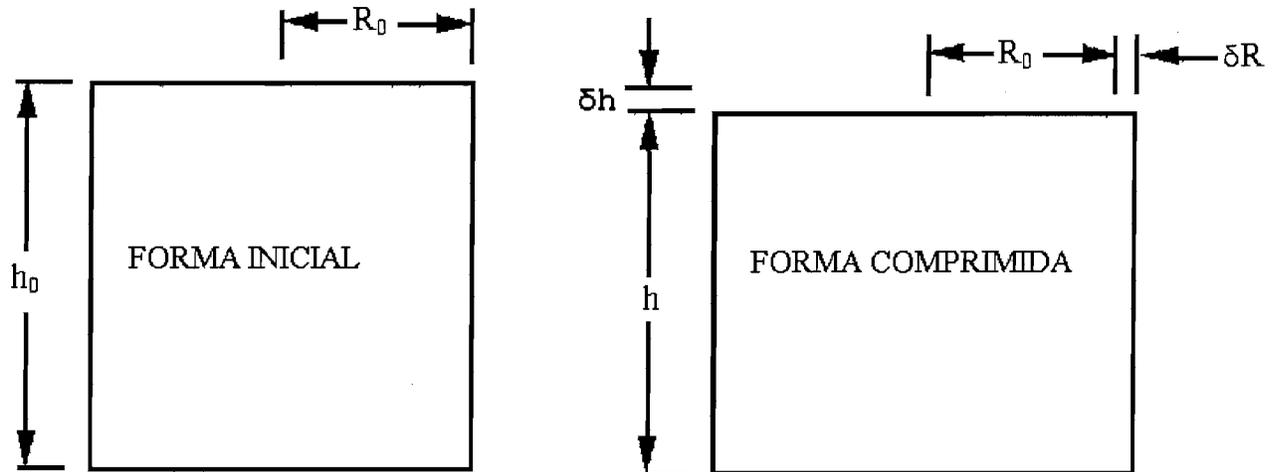


Figura 2.3 Compresión uniaxial de una muestra cilíndrica (Steffe, 1996).

El coeficiente de Poisson puede encontrarse en intervalos desde 0 a 0.5. Normalmente,  $\nu$  varía desde 0.0 para materiales rígidos que contienen una gran cantidad de aire y cerca de 0.5 para materiales líquidos. Valores desde 0.2 hasta 0.5 son comunes en materiales biológicos, el 0.5 representa sustancias incompresibles como la papa fresca, la manzana que tiene un alto contenido de gas celular presenta valores 0.2 (Steffe, 1996).

## 2.3 MATERIALES FLUIDOS

El fluido es un material que siempre fluye bajo la aplicación continua de un esfuerzo, la deformación crece, mientras el esfuerzo sea aplicado. El fluido disipa la energía en forma de calor, se dice que tiene amnesia total. El modelo mecánico utilizado para un fluido viscoso es el de un amortiguador (Figura 2.4). El amortiguador contiene en su interior un fluido viscoso ideal (newtoniano). Conforme la fuerza actúa sobre el pistón, la sustancia se deforma continuamente; cuando la fuerza se retira, el pistón permanece en su última posición y el fluido permanece deformado. La energía que actúa en el líquido viscoso es totalmente liberada a los alrededores como calor y al material como trabajo de deformación (Tanner, 1988).

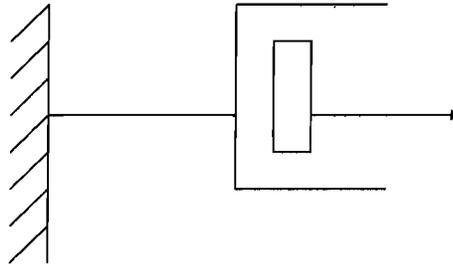


Figura 2.4 Modelo mecánico del líquido viscoso (Rao y Steffe, 1992).

Los fluidos pueden ser estudiados sometidos a cizallamiento continuo, tal como el flujo entre dos placas paralelas, en donde el fluido ocupa el espacio entre las placas (Figura 1.5), donde un esfuerzo actúa sobre la placa superior para mantenerla en movimiento, resultando en un esfuerzo de cizalla. El flujo descrito es cizalla simple estacionaria para el que la velocidad de cizalla queda definida como la velocidad de cambio de la deformación (ecuación 1.10). Esta definición sólo aplica a flujo laminar entre placas paralelas.

En flujo viscométrico, que es aquel en el que la velocidad de cizalla no depende del tiempo, y que incluye el flujo rotacional entre cilindros concéntricos y cono y placa, entre otros, el estado de esfuerzos queda determinado por tres funciones materiales: la función viscosidad,  $\eta(\dot{\gamma})$ , y el primer y segundo coeficientes de esfuerzos normales,  $\Psi_1(\dot{\gamma})$  y  $\Psi_2(\dot{\gamma})$ . Desde el punto de vista industrial la función de viscosidad es la más importante, convirtiéndose así en la de principal interés. Esta función involucra el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla, cuya relación se establece a partir de datos experimentales. El comportamiento del material se visualiza al graficar el esfuerzo de cizalla (ordenada) contra la velocidad de cizalla (abscisas); la curva resultante se modela matemáticamente. El modelo más simple es el newtoniano. Otra representación gráfica común en los fluidos es la curva de viscosidad (viscosidad en función de la velocidad de cizalla) (Lapasin y Prici, 1995).

### 2.3.1 Fluido newtoniano

La primera relación constitutiva para un fluido viscoso la estableció Isaac Newton en 1687 al proponer que para estos fluidos el esfuerzo aplicado y la deformación producida son proporcionales. Esto implica que la velocidad relativa de las capas de fluido no es la misma,

por lo tanto la relación de Newton también puede expresarse diciendo que el esfuerzo de cizalla y el cambio de la velocidad de cizalla en el fluido son proporcionales. A la constante de proporcionalidad se le define como la viscosidad del fluido; por esta razón a esta relación constitutiva lineal también se le llama ley de la viscosidad de Newton. A los fluidos cuyo comportamiento mecánico se describe adecuadamente en términos de esta relación constitutiva se les llama fluidos newtonianos. El agua y el aire, que son los fluidos más abundantes de la Tierra, se comportan como newtonianos con una excelente aproximación. Estos fluidos también son los más estudiados y los mejor comprendidos; a las ecuaciones que gobiernan su movimiento (flujo) se les conoce como las ecuaciones de Navier Stokes y fueron formuladas desde mediados del siglo antepasado por el ingeniero francés Louis Marie Navier y por el físico inglés George Gabriel Stokes (<http://omega.ilce.edu.mx>). La descripción del flujo basada en estas ecuaciones resultó muy exitosa, pues ha permitido entender muchos fenómenos y conduce a predicciones que se ajustan muy bien con el experimento. Sin embargo, aún persisten problemas teóricos y prácticos que no han podido resolverse. Es conveniente subrayar que, según la relación de Newton, no sólo las magnitudes de la “causa” (esfuerzo aplicado) y el “efecto” (deformación o flujo) son proporcionales, sino que la relación entre ellas también es “instantánea”. Esto significa que al flujo en el instante de observación sólo contribuye el esfuerzo aplicado en el mismo instante de tiempo.

### Viscosidad

Este término es frecuentemente llamado viscosidad dinámica o viscosidad absoluta. Es la fricción interna de un líquido que se resiste a fluir y usualmente se denota por  $\eta$  y está definida por la siguiente ecuación:

Viscosidad = esfuerzo de cizalla/velocidad de cizalla

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (2.5)$$

La viscosidad dinámica, la cual es función sólo de la fricción interna del fluido, es la cantidad más frecuentemente usada en el diseño de equipos y el cálculo de flujo de alimentos procesados. Normalmente se expresaba en poise (P) o centipoise (cP, donde 1 cP = 0,01 P), actualmente se expresa en unidades del Sistema Internacional como Pascales por segundo (Pa.s, donde 1 Pa.s = 10 P) (Steffe, 1996).

**Viscosidad cinemática**

Debido a que en algunos casos, como en sistemas de bombeo, es más conveniente determinar la viscosidad de manera tal que tenga en cuenta la densidad del fluido, para caracterizar a los materiales a veces se utiliza la viscosidad cinemática,  $\nu$ , que es la viscosidad absoluta dividida por la densidad del fluido, ambos medidos a la misma temperatura (Ecuación 2.6).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho \dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

Las unidades más comunes que se utilizan para expresar la viscosidad cinemática son: stokes (St) o centistokes (cSt, donde 1 cSt = 0.01 St), o en unidades del SI como milímetros cuadrados por segundo (mm<sup>2</sup>/s, donde 1 mm<sup>2</sup>/s = 1 cSt).

La viscosidad cinemática se mide en viscosímetros capilares o tipo tubo debido a que la velocidad del fluido en este tipo de viscosímetros es proporcional a la densidad tanto como a la viscosidad. La viscosidad cinemática es muy utilizada en la industria del petróleo donde la gravedad específica de los hidrocarburos líquidos no varía mucho. Sin embargo, en la industria de los alimentos no es tan utilizada debido a que un amplio intervalo de densidades se pueden encontrar lo cual coloca a la viscosidad cinemática dentro de un intervalo más pequeño que la viscosidad absoluta (Bourne, 1982).

Dentro de los alimentos típicos newtonianos se encuentran aquellos que contienen componentes de bajo peso molecular, por ejemplo los azúcares, y/o aquellos que contienen muy bajas concentraciones de biopolímeros disueltos, tales como pectinas, proteínas, almidón, entre otros, y aquellos con bajo contenido de sólidos insolubles (Rao, 1999). Otros ejemplos de alimentos con comportamiento newtoniano incluyen agua, jarabes de azúcar, la mayoría de las mieles sin cristales, la mayoría de las bebidas carbonatadas, leche y los jugos de fruta clarificados en un amplio intervalo de concentraciones; entre ellos están el jugo de limón y el de manzana. También se comportan como newtonianos algunos jugos con bajo contenido de pulpa, como el jugo de frambuesa, hasta una concentración de sólidos solubles de 30° Brix (Bourne, 1982).

La experiencia ha demostrado que la gran variedad de líquidos newtonianos tienen una característica común, a saber, las moléculas que los componen son ligeras, es decir, de bajo

peso molecular. Puede decirse que la relación constitutiva de Newton describe bien el flujo de fluidos cuyas moléculas tienen pesos moleculares máximos de 1 000 Da, aproximadamente. Sin embargo, cuando las moléculas de un fluido son muy pesadas, por ejemplo con pesos moleculares mayores de 100 000 Da, la ley de viscosidad de Newton ya no describe adecuadamente el flujo de estos fluidos; las relaciones constitutivas ya no son tan simples, pues dejan de ser instantáneas, aunque todavía pueden ser lineales. A esta clase de fluidos se les llama “no newtonianos” (<http://omega.ilce.edu.mx>).

### 2.3.2 Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos se definen como aquellos que exhiben flujo uniforme, pero para los que no es constante la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla, por lo que la viscosidad del fluido no permanece constante. Estos materiales, en lugar de tener un coeficiente de viscosidad,  $\eta$ , poseen un coeficiente de viscosidad aparente,  $\eta_{app}$ , que se define como la relación entre un esfuerzo de cizalla puntual y la velocidad de cizalla correspondiente cuando la relación entre ambos no es lineal. Su valor depende de la velocidad de cizalla (Aguilera y Durán-Hidalgo, 1996).

#### Fluidos independientes del tiempo

Muchos sistemas alimenticios incluyendo emulsiones, suspensiones, dispersiones de moléculas grandes, entre otros, pueden mostrar comportamiento newtoniano sólo a muy bajas velocidades de cizalla. A mayores velocidades de cizalla, correspondientes a las condiciones de proceso o aplicación de los productos alimenticios (Cuadro 2.1), tales sistemas se pueden desviar del comportamiento ideal en diferentes formas, ilustradas en las Figuras 2.5 y 2.6.

#### A) Fluidificantes por cizalla o reofluidizantes

Los fluidos reofluidizantes (“shear thinning”), son el tipo más común del comportamiento no newtoniano y son conocidos también como pseudoplásticos, debido a que los fluidos son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de cizallamiento que cuando son

sometidos a un cizallamiento lento. La viscosidad aparente depende de la velocidad de cizalla, pero no del tiempo en que están sometidos al esfuerzo de cizalla. La velocidad de cizallamiento aumenta en proporciones más altas que el esfuerzo aplicado, de manera que la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de cizalla (Figura 2.6). Con estos fluidos la curva de flujo parte del origen de la gráfica, pero es cóncava hacia arriba (Figura 2.5).

Cuadro 2.1 Velocidades de cizalla típicas de operaciones industriales y aplicación de productos (Lapasin y Pricl, 1995).

<i>OPERACIÓN</i>	<i>INTERVALO DE VELOCIDAD DE CIZALLA (S<sup>-1</sup>)</i>
Drenado bajo gravedad	10 <sup>-1</sup> - 10 <sup>1</sup>
Extrusión	10 <sup>0</sup> - 10 <sup>2</sup>
Masticado y deglución de alimentos	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>2</sup>
Aplicación coberturas	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>2</sup>
Mezclado y agitación de líquidos	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>3</sup>
Flujo en tuberías	10 <sup>0</sup> - 10 <sup>3</sup>
Aspersión	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>

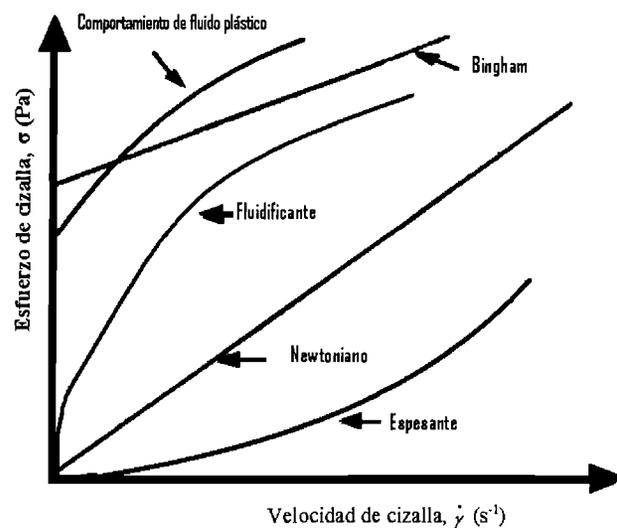


Figura 2.5 Curvas de flujo (Steffe, 1996).

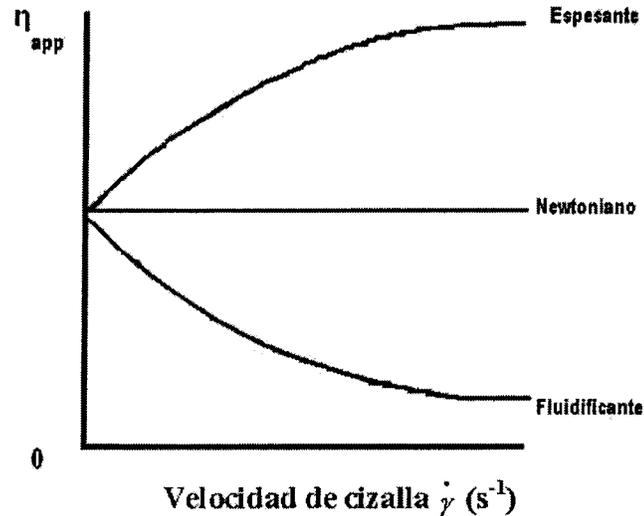


Figura 2.6 Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para varios alimentos con carácter de “líquido” (Van Vliet, 2001).

Se prefiere el empleo de la expresión fluidificante, en comparación con la de pseudoplástico, debido a que la primera corresponde a una descripción más adecuada de las curvas de flujo características de este comportamiento (Rao, 1999).

La mayoría de los alimentos no newtonianos presentan comportamiento fluidificante, leche concentrada, soluciones concentradas de macromoléculas, tales como xantana y goma guar y diversos jugos de frutas (Van Vliet, 2001), aderezos para ensaladas y concentrados de frutas, el cual es atribuido a cambios estructurales debidos a las fuerzas hidrodinámicas generadas por el esfuerzo aplicado (Rao, 1999; Schramn, 1994; Windhab, 1995).

Los materiales fluidificantes no muestran un esfuerzo de fluencia o umbral,  $\sigma_0$ , y la curva típica de flujo para estos materiales indica que la relación esfuerzo de cizalla/velocidad de cizalla disminuye progresivamente conforme aumenta la velocidad de cizalla. Esta curva de flujo se vuelve lineal sólo a muy altas velocidades de cizalla. Su pendiente limitante es conocida como la viscosidad a una velocidad infinita ( $\eta_\infty$ ). La gráfica logarítmica del esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla para estos materiales generalmente es lineal con una pendiente entre cero y la unidad.

### B) *Espesantes por cizalla o reoespesantes*

Los fluidos espesantes por cizalla (“shear thickening”), nombrados también como dilatantes son similares a los fluidificantes en que ellos no muestran un esfuerzo de umbral  $\sigma_0$ , pero la viscosidad aparente para estos materiales aumenta con respecto al aumento de la velocidad de cizalla. El término “espesante” se ha usado para todos los fluidos que exhiben la propiedad de incrementar la viscosidad aparente con el aumento de la velocidad de cizalla (Tanner, 1988). La gráfica no es lineal, pero los valores de  $\sigma$  y  $\dot{\gamma}$  están unívocamente relacionados; su viscosidad aparente  $\eta_{ap}$ , aumenta al aumentar la velocidad de cizalla (Figuras 2.5 y 2.6). En procesos industriales el comportamiento espesante de alimentos es mucho menos común que el de los fluidificantes. Ejemplos de comportamiento espesante son suspensiones concentradas de gránulos de almidón, fécula de maíz en etilenglicol y soluciones concentradas de varias macromoléculas preferentemente a valores altos de  $\dot{\gamma}$  (Van Vliet, 2001).

### C) *Plásticos*

El término “plástico” se refiere a los materiales que exhiben un esfuerzo de fluencia o de cedencia,  $\sigma_0$ , antes de empezar a fluir, no se refiere a los plásticos sintéticos. La principal característica de estos fluidos es que con bajos esfuerzos de cizalla, se comportan como sólidos y no sufren una deformación evidente hasta que alcanzan una fuerza de cizalla crítica  $\sigma_0$ , a partir de la cual los fluidos tienden a desplazarse en forma de líquido, es decir, en este comportamiento el material se comporta como sólido elástico hasta cierta deformación y luego fluye como líquido. La explicación del comportamiento de un material es que el fluido en reposo tiene una estructura tridimensional de suficiente rigidez para resistir esfuerzos menores que el esfuerzo de fluencia  $\sigma_0$ . Si este esfuerzo es excedido la estructura se desintegra y el sistema se comporta como un fluido bajo un esfuerzo de cizalla  $\sigma - \sigma_0$ ; cuando el esfuerzo de cizalla cae abajo del esfuerzo de fluencia, la estructura se recupera (Tanner, 1988). Este tipo de comportamiento frecuentemente se encuentra en alimentos. Ejemplos típicos son: catsup, mayonesa, crema batida, clara de huevo batida, mantequilla,

puré de manzana y margarina, se comportan como sólidos bajo esfuerzos pequeños y se parecen a líquidos bajo esfuerzos grandes (Bourne, 1982).

Bingham señaló que el comportamiento al flujo de muchos materiales que poseen un punto de fluencia, en una curva de flujo o reograma se puede aproximar a una línea recta que intercepta el eje en el punto de fluencia. Dos índices numéricos están disponibles para describir este comportamiento: el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica, derivada de la pendiente de la línea recta. Tales materiales son llamados cuerpos de Bingham. El punto de fluencia de un cuerpo de Bingham marca la destrucción de una estructura interna estática. Bajo cizalla, más allá del punto de fluencia, la estructura puede deteriorarse más, lo cual causa una reducción de la viscosidad aparente, como se describe para los materiales fluidificantes (Morrison y Ross, 2002).

En la Figura 2.7 se muestran características de tres fluidos plásticos: A representa un esfuerzo de fluencia bajo, la velocidad de cizalla del fluido es directamente proporcional al esfuerzo de cizalla después de que el esfuerzo de fluencia ha sido excedido. Los fluidos B y C muestran un mayor esfuerzo de fluencia que el fluido A, la velocidad de cizalla de los fluidos B y C es también directamente proporcional al esfuerzo de cizalla después de que el esfuerzo de umbral ha sido excedido. Note que las líneas no parten del origen. Hay siempre una intercepción (esfuerzo de fluencia) en el eje vertical. La viscosidad aparente decrece con el incremento de la velocidad de cizalla. Note que la viscosidad aparente del fluido A, puede ser mayor o menor que la de los fluidos B y C, dependiendo de la velocidad de cizalla a la cual se realice la medición (Bourne, 1982).

Muchos alimentos son dispersiones de sólidos en un medio líquido (suspensiones), o de un fluido en otro (emulsiones), si la concentración de la fase dispersa o de las macromoléculas de la fase continua es alta, la fuerza de interacción genera que se produzca un valor  $\sigma_0$ , esto representa una fuerza crítica que debe ser aplicada antes de que se produzca movimiento.

El esfuerzo inicial es una importante propiedad en dispersiones de alimentos que contienen sólidos en suspensión. La magnitud del esfuerzo de fluencia es muy importante en la operación de transporte con bombas, para la determinación de estabilidad de suspensiones y en la aceptabilidad del producto por el consumidor (Morrison y Ross, 2002).

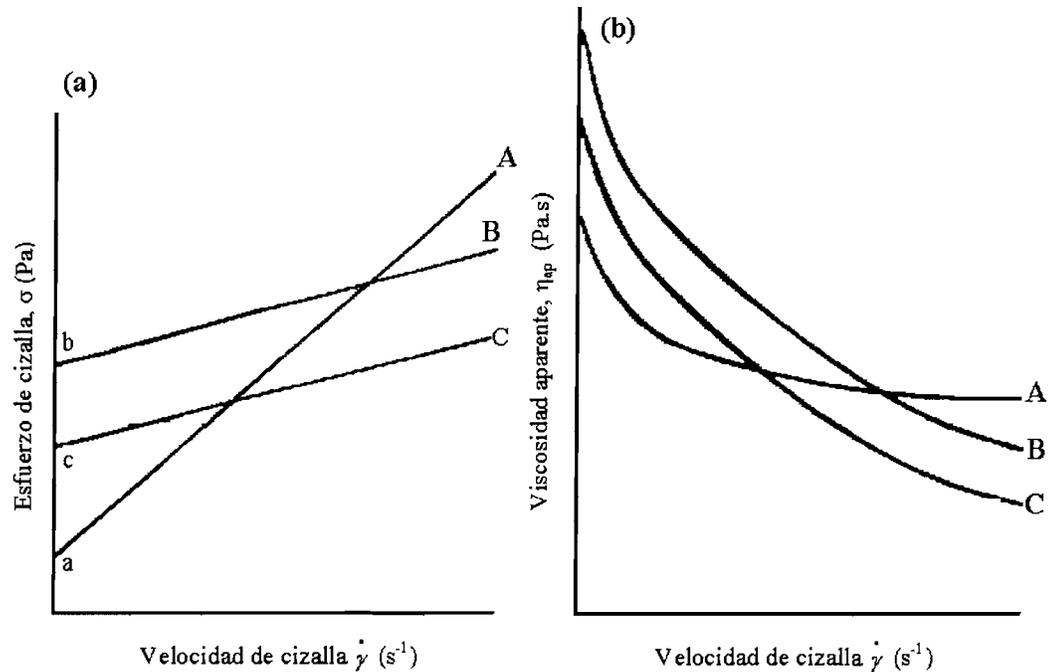


Figura 2.7 Fluidos plásticos A, B y C. (a) Esfuerzo de cizallamiento en función de la velocidad de cizalla, (b) Viscosidad aparente en función a la velocidad de cizalla (Bourne, 1982).

### *Evaluación del esfuerzo de fluencia.*

El esfuerzo de fluencia, se puede definir como el esfuerzo de cizalla mínima necesaria para iniciar el flujo. Algunos autores expresan que este valor de fluencia no existe ya que todo fluye dándole suficiente tiempo o utilizando equipo de medición muy sensible; sin embargo, hay pocas dudas sobre si  $\sigma_0$  es una realidad desde el punto de vista de ingeniería, que puede influir fuertemente con los cálculos de los procesos ([www.geocities.com/joooola/osorio.pdf](http://www.geocities.com/joooola/osorio.pdf)).

Hay muchas maneras de evaluar el valor de fluencia y no una única “mejor” técnica. Los dos métodos principales para la medición del esfuerzo de fluencia, son: dinámicos y estáticos. Un ejemplo de métodos dinámicos es la extrapolación de la curva de flujo hasta la velocidad de cizalla cero, con base en datos experimentales y con el uso de un modelo reológico dado. Los valores obtenidos usando este método pueden ser fuertemente influenciados por el modelo reológico (Bingham, Herschel-Bulkley, entre otros) seleccionado para representar los datos. Un procedimiento numérico alternativo es graficar la viscosidad aparente en función al esfuerzo

de cizalla y  $\sigma_0$  se determina relacionado a una velocidad de cizalla cero, donde  $\eta_{ap}$  se hace infinita (Ibarz y col., 2005; Steffe, 1996).

Cheng (1986), realizó un estudio sobre el esfuerzo de fluencia y demostró que las magnitudes de los valores medidos de umbral de fluencia están fuertemente asociados con relajamiento, crecimiento del esfuerzo de cizalla, tixotropía y los tiempos característicos de estas respuestas transientes. Cheng describió un concepto de valores de fluencia estáticos y dinámicos los cuales son muy importantes en el estudio reológico de fluidos alimenticios.

El esfuerzo de fluencia medido en una muestra en reposo a la cual no se le ha aplicado previamente ninguna deformación es el esfuerzo de fluencia estático. El esfuerzo de fluencia de una muestra, a la cual se le ha aplicado deformaciones que la han llevado a una destrucción completa de su estructura interna, es el esfuerzo de fluencia dinámico, (Figura 2.8) y es a menudo determinado mediante extrapolación de la curva de equilibrio. El esfuerzo de fluencia estático puede ser significativamente más alto que el esfuerzo de fluencia dinámico. Si el material recupera su estructura durante un corto intervalo de tiempo (lo que es poco común en productos alimenticios), entonces se puede utilizar un parámetro cinético para describir totalmente la conducta reológica.

La idea de un esfuerzo de fluencia estático y dinámico se puede explicar suponiendo que puede haber más de un tipo de estructura en un fluido. Una estructura puede ser insensitiva a la velocidad de cizalla y sirve para definir la curva de flujo de equilibrio; la otra estructura, la estructura débil, se forma en un cierto intervalo de tiempo cuando la muestra está en reposo. Las dos estructuras combinadas causan una resistencia a fluir que determina el esfuerzo de fluencia estático. El tipo de comportamiento recién descrito se ha observado, aunque no mencionado en los términos de esfuerzo de fluencia estático y dinámico, para varios productos alimenticios: puré de manzana, alimentos infantiles de plátano y durazno, mostaza, catsup, carne y extractos de levadura. También, la misma terminología (y esencialmente el mismo significado) fue utilizado para interpretar información reológica para margarina (Steffe, 1996).

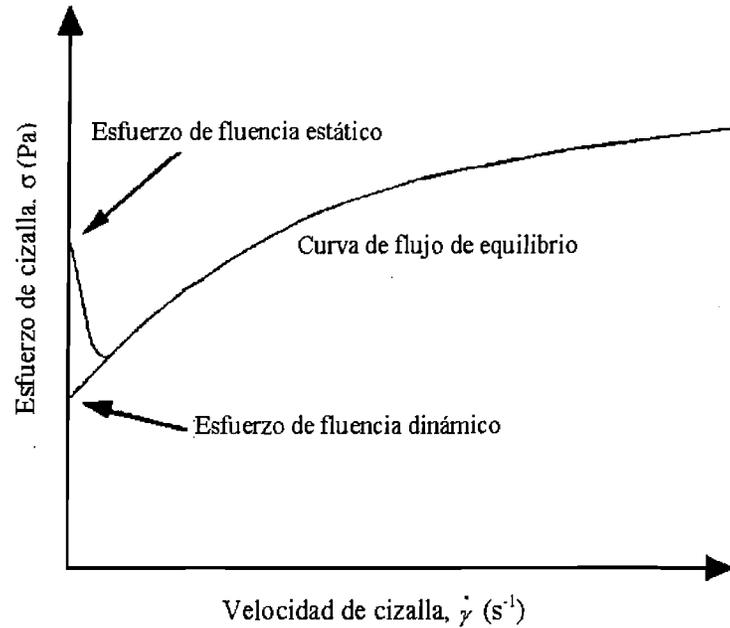


Figura 2.8 Esfuerzo de fluencia estático y dinámico (Yoo y col., 1995).

Otro método dinámico para la determinación del esfuerzo de fluencia está basado en el análisis de la gráfica de viscosidad aparente en función del esfuerzo de cizalla. La viscosidad tiende a ser infinita cuando el valor del esfuerzo de umbral o de cedencia se alcanza. Por lo tanto, el valor del esfuerzo de cizalla en el que la curva muestra un incremento de la pendiente es considerado como el valor del esfuerzo de cedencia.

Un método estático para la evaluación del esfuerzo de fluencia es determinar la mínima fuerza necesaria para iniciar el flujo, en éstos el uso de reómetros es muy útil. El método de espas se basa en esta idea. Con el uso de esta técnica, el esfuerzo de fluencia puede ser calculado por el máximo valor de torque registrado a bajas velocidades de rotación con un viscosímetro de control de la velocidad de cizalla.

El torque<sup>1</sup> máximo, (TM), el diámetro y la altura del aspa son usados para el cálculo del esfuerzo de fluencia,  $\sigma_0$  (Cullen y col., 2003).

### Fluidos dependientes del tiempo

Muchos fluidos reales no pueden ser descritos con una simple ecuación reológica en los cuales la relación entre esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla sea independiente del tiempo. La viscosidad de la mayoría de los fluidos complejos depende no únicamente de la velocidad de cizalla, sino también del tiempo de aplicación del esfuerzo. Este tipo de fluidos se pueden subdividir en dos clases (Figura 2.9) (Tanner, 1988):

- A) Fluidos tixotrópicos
- B) Fluidos antitixotrópicos (reopécticos)

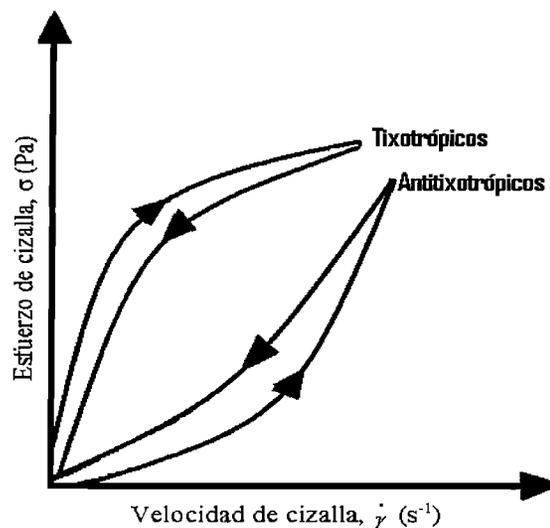


Figura 2.9 Curva de fluidos no newtonianos de propiedades dependientes del tiempo de cizallamiento (Tanner, 1988).

<sup>1</sup> **El torque:** es la fuerza aplicada en una palanca que hace rotar alguna cosa. Al aplicar fuerza en el extremo de una llave se aplica un torque que hace girar las tuercas. En términos científicos el torque es la fuerza aplicada por el largo de la palanca (Torque= $F \times D$ ), y se mide comúnmente en Newtons por metro (Daintith, 2000).

El comportamiento tixotrópico es común en muchos alimentos, pero la antitixotropía a menudo no se encuentra en los alimentos. El comportamiento dependiente del tiempo se atribuye a los cambios en la estructura del material. Los materiales decremantan e incrementan su esfuerzo de cizalla y su viscosidad aparente con el tiempo, respectivamente. Es decir, a una velocidad de cizalla fija los materiales son fluidos espesantes o fluidificantes. Este fenómeno puede ser irreversible o parcialmente reversible (Van Vliet, 2001).

#### A) Fluidos tixotrópicos

Los materiales tixotrópicos son fluidos adelgazantes con respecto al tiempo de deformación (cizalla), es decir, la viscosidad aparente  $\eta_{ap}$ , disminuye al aumentar la velocidad de cizalla y el tiempo de cizalla, hasta un punto en el cual la  $\eta_{ap}$  permanece constante. La representación gráfica que les corresponde es una curva similar a la de los fluidos fluidificantes (Figuras 2.9 y 2.10). Si un material tixotrópico es sometido a un esfuerzo de cizalla a una velocidad constante después de un período de reposo, la estructura se romperá progresivamente y la viscosidad decrecerá con el tiempo. La velocidad del rompimiento de la estructura durante la aplicación del esfuerzo de cizalla a una velocidad dada dependerá del número de enlaces de la estructura disponibles para la disminución de la consistencia con respecto al tiempo. La simultánea velocidad de regeneración de la estructura incrementará con el tiempo conforme incrementa el número de nuevos posibles enlaces. Eventualmente un estado de equilibrio dinámico podrá ser alcanzado cuando la velocidad de regeneración de la estructura se iguale a la velocidad de rompimiento.

La macroestructura de un material tixotrópico se destruye completamente bajo la influencia de grandes esfuerzos de cizalla y se comporta como un líquido después de que el esfuerzo ha sido removido, hasta el tiempo en el que la estructura se recupere (Tanner, 1988).

Una consecuencia directa del comportamiento tixotrópico es que la viscosidad aparente se ve afectada por todas las manipulaciones que implican el flujo del material, tales como el vertido del material fuera del envase o en el llenado del cuerpo de medida de un reómetro. Esta dependencia de la historia puede afectar fuertemente los resultados de una prueba reológica. Algunos ejemplos de fluidos tixotrópicos (al agitar se hace fluido y se espesa

cuando cesa el esfuerzo) (Schramm, 1994): salsa de tomate, algunas jaleas, crema ácida comercial, entre otros.

## B) Antitixotrópicos (reopécticos)

Los materiales antitixotrópicos son espesantes, dependientes del tiempo de aplicación del esfuerzo de cizalla en los que la gráfica  $\sigma$  en función de  $\dot{\gamma}$  representa un comportamiento curvilíneo y para los cuales estos dos parámetros no están unívocamente relacionados (Figura 2.9). Existen dos valores de  $\dot{\gamma}$  para cada valor de  $\sigma$ , y a la inversa, si se hacen pruebas cíclicas. La antitixotropía es un fenómeno inverso a la tixotropía (Figura 2.10). Al agitar vigorosamente a velocidad constante se hace más viscoso con el tiempo) (Tanner, 1988; Schramm, 1994).

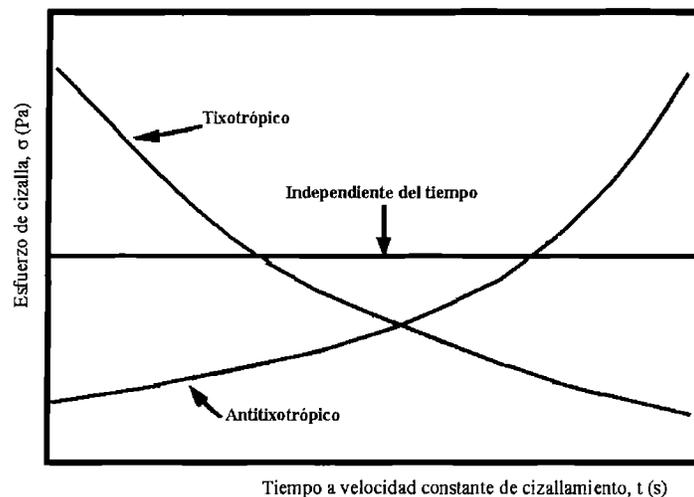


Figura 2.10 La Antitixotropía es un fenómeno inverso a la tixotropía (Steffe, 1996).

Este es un caso de formación gradual de estructura mediante la aplicación de un esfuerzo de cizallamiento, y gradualmente se desintegrará cuando permanezca en reposo (Tanner, 1988).

## 2.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Hasta el momento se han mencionado las principales categorías en las cuales los diferentes comportamientos reológicos de los alimentos se pueden clasificar de acuerdo con la

respuesta de tales materiales. Ahora se mencionaran algunas aproximaciones propuestas y empleadas para describir los diferentes comportamientos al flujo y su relativo formalismo matemático. La múltiple cantidad de comportamientos reológicos encontrados tiene su origen en la existencia de muchas clases de sustancia y alimentos con una gran variedad de características estructurales, de tal forma que no se puede encontrar una única aproximación que permita la descripción adecuada y confiable para la interpretación de datos experimentales. Por tal motivo, existen una gran variedad de aproximaciones fenomenológicas cuyo objetivo es la definición de un modelo por medio de cual se pueda alcanzar la máxima concordancia entre las propiedades reológicas experimentales de un fluido y las predichas. El desarrollo histórico de esta clase de modelos recae en un procedimiento de prueba y error, basado en una comparación directa con el comportamiento real de los materiales. Debido a que las características estructurales no son tomadas en cuenta en estas ecuaciones constitutivas, éstas son incapaces de predecir la dependencia de las propiedades de los materiales a partir de parámetros moleculares o factores de composición. Podemos mencionar algunos modelos correspondientes a la aproximación fenomenológica los cuales tienen varios niveles de complejidad y manejo matemático que son más o menos familiares para científicos y tecnólogos en el área de la industria y la academia (Cuadro 2.2), observando que entre más sofisticado es el modelo, mayor es su habilidad para describir el comportamiento real y su adaptabilidad a las diferentes características de los materiales. A pesar de ello, existen algunas clases de materiales para los cuales aún no se ha encontrado un modelo reológico satisfactorio, tales como suspensiones concentradas y geles débiles cuyas propiedades físicas y peculiares características estructurales conjuntan notables problemas para su modelación reológica (Lapasin y Pricl, 1995).

La breve lista mostrada en el Cuadro 2.2 representa sólo una pequeña fracción de las numerosas ecuaciones reportadas en la literatura para la descripción de diferentes comportamientos dependientes de la cizalla. La ecuación de la ley de la potencia propuesta por Ostwald y de Waele (Ecuación 2.6) es adecuada para describir tanto el comportamiento fluidificante por cizalla ( $n < 1$ ) como el espesante ( $n > 1$ ). Para  $n = 1$ , se obtiene la ley de Newton.

Cuadro 2.2 Ecuaciones empíricas para explicar el comportamiento reológico de materiales (Steffe, 1996; Lapasin y Pricl, 1995; Tanner, 1988)

Modelo	$\sigma(\dot{\gamma})$	Ecuación
Ostwald de Waele	$\sigma = k (\dot{\gamma})^n$	2.6
Powell-Eyring	$\sigma = \eta_{\infty} \dot{\gamma} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \dot{\gamma} \frac{\arccos(\cos(\lambda \dot{\gamma}))}{\lambda \dot{\gamma}}$	2.7
Cross	$\sigma = \eta_{\infty} \dot{\gamma} + \frac{(\eta_0 - \eta_{\infty}) \dot{\gamma}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}}$	2.8
Carreau	$\sigma = \eta_{\infty} \dot{\gamma} + \frac{(\eta_0 - \eta_{\infty}) \dot{\gamma}}{(1 + \lambda \dot{\gamma}^2)^{\frac{1-n}{2}}}$	2.9
Bingham	$\sigma = \eta_p \dot{\gamma} + \sigma_0$	2.10
Casson	$(\sigma_0)^{1/2} = (\sigma_0)^{1/2} + \kappa_1 \dot{\gamma}^{(1/2)}$	2.11
Herschel-Bulkley	$\sigma = \kappa \dot{\gamma}^n + \sigma_0$	2.12

Para muchos sistemas (soluciones, dispersiones de polisacáridos y proteínas, geles débiles) podemos identificar una región media de velocidad de cizalla (zona II, Figura 2.11 b), en la cual la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla que puede ser descrita confiablemente por la ecuación de la ley de la potencia. Si tomamos en cuenta que tal región es importante en muchos procesos industriales en alimentos (Cuadro 2.1) y que la ecuación 2.6 es extremadamente simple, se puede entender por qué es la expresión más popular en ingeniería y se emplea para resolver problemas industriales de flujo y transferencia de calor (Rao, 1999; Lapasin y Prici, 1995).

Cuando se obtienen datos experimentales sobre un intervalo mayor de velocidades de cizalla, la ecuación de la ley de la potencia no es suficientemente adecuada para la descripción del comportamiento real, debido a que para muchos sistemas, la viscosidad tiende asintóticamente a un valor constante para  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  (viscosidad a cizalla cero,  $\eta_0$ ; zona I, Figura 2.11b) y para  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$  (viscosidad a cizalla infinita,  $\eta_\infty$ ; zona III, Figura 2.11b).

En consecuencia estos datos se deben correlacionar con modelos que posean al menos tres parámetros. La ecuación 2.7 es una modificación de la ecuación original de Eyring, derivada de la teoría de la velocidad de procesos y contiene sólo tres parámetros ajustables:  $\eta_0$ ,  $\eta_\infty$  y el tiempo característico,  $\lambda$ . Con el objetivo de obtener una mejor correlación entre los valores experimentales y los predichos, más allá de la región central de velocidades de cizalla, se han empleado ecuaciones de cuatro parámetros, como los modelos de Cross y de Carreau (ver ecuaciones 2.8 y 2.9 en Cuadro 2.2, respectivamente). En ambas ecuaciones el parámetro adicional, el índice adimensional  $n$ , corresponde al exponente de la ecuación de la ley de la potencia el cual aproxima la curva de flujo  $\eta(\dot{\gamma})$  en la región media de velocidad de cizalla. El valor de  $\lambda$  define la posición de la zona de la ley de la potencia sobre la escala de velocidades de cizalla (Lapasin y Prici, 1995; Tanner, 1988).

Los modelos siguientes, en el Cuadro 2.2, son adecuados para describir comportamientos plásticos, ya que incluyen el esfuerzo de fluencia,  $\sigma_0$ . Para  $\sigma > \sigma_0$  la viscosidad de cizalla es finita y generalmente disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla, como se puede deducir de las expresiones reportadas, donde  $\sigma(\dot{\gamma})$ .

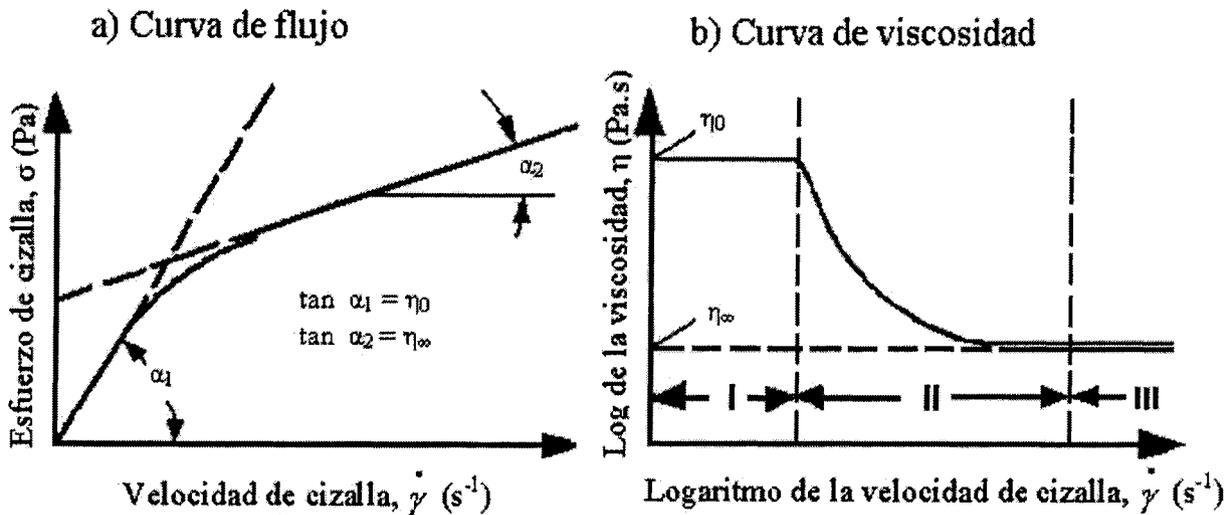


Figura 2.11 Líquidos reofluidizantes dependientes de la velocidad de cizalla (Schramm, 1994).

La única excepción está dada por la ecuación 2.12 para  $n > 1$ , el cual corresponde a un comportamiento plástico espesante. Las ecuaciones de Bingham, Casson y Herschel-Bulkley son ampliamente usadas en el campo de la industria de alimentos para correlacionar datos de viscosidad de pastas, y suspensiones, entre otros. Los parámetros de estos modelos son derivados del ajuste y correlación gráfica de los datos. Las ecuaciones de Bingham y Casson contienen sólo dos parámetros ajustables, por lo que son candidatos para ser usados como modelos de referencia en el análisis de transición de flujo laminar/turbulento o para el cálculo de coeficientes de fricción, dado que sólo dos grupos adimensionales son necesarios para caracterizar las condiciones de flujo en fluidos plásticos (Lapasin y Prici, 1995). En donde

$\eta_p$  y  $K_1$ , son parámetros que representan la viscosidad del sistema. El modelo Herschel-Bulkley es apropiado para muchos fluidos alimenticios (Cuadro 2.3). Su conveniencia radica en que tanto el comportamiento newtoniano, la ley de la potencia (fluidificante o espesante) y el plástico de Bingham pueden ser considerados como casos especiales de dicho modelo (Steffe, 1996).

Para los modelos de la potencia (Ostwald de Walle), newtoniano y plástico de Bingham,  $K$  es comúnmente llamada índice de consistencia, ( $\eta$ ) viscosidad y ( $\eta_p$ ) viscosidad plástica, respectivamente.

Cuadro 2.3 Parámetros reológicos para fluidos (Steffe, 1996).

FLUIDO	$k$	$n$	$\sigma_0$	EJEMPLOS TÍPICOS
Herschel-Bulkley	$> 0$	$0 < n < \infty$	$> 0$	Pasta de pescado, pasta de pasa.
Newtoniano	$> 0$	1	0	Agua, jugo de fruta, leche, miel sin cristales, aceite vegetal.
fluidificante	$> 0$	$0 < n < 1$	0	Puré de manzana, puré de plátano, jugo concentrado de naranja.
Espesante	$> 0$	$1 < n < \infty$	0	Algunos tipos de miel, soluciones de almidón al 40%.
Plástico de Bingham	$> 0$	1	$> 0$	Pasta de dientes, puré de tomate.

Aunque los modelos mencionados en el Cuadro 2.2 son particularmente útiles en la solución de problemas que involucran flujos de cizalla en estado estacionario, su uso es inapropiado para el tratamiento de flujo no estacionario y describir propiedades de fluidos no newtonianos dependientes del tiempo.

El ejemplo más típico y más común de un fluido no newtoniano es el de un fluido polimérico. La característica esencial de estos sistemas es que sus moléculas son muy pesadas, con pesos moleculares ente 100 000 y 100 000 000, y por eso se les llama macromoléculas (Pine, 1988). Los polímeros tienen gran importancia en la vida y la civilización humanas. Todas las formas de vida dependen de materiales poliméricos como los ácidos nucleicos, las proteínas, los carbohidratos, entre otros. La palabra polímero se deriva de dos vocablos griegos, *polys* que significa muchos y *meros*, parte o unidad. Como su nombre lo indica, las moléculas de un polímero están formadas por muchas unidades o monómeros de bajo peso molecular que se mantiene unidos entre sí por fuerzas intermoleculares muy intensas llamadas enlaces covalentes. El proceso mediante el cual estas unidades se unen sucesiva y repetidamente para formar cadenas largas y pesadas (macromoléculas), se llama polimerización (<http://omega.ilce.edu.mx>).

A diferencia de los fluidos newtonianos, el estudio de la dinámica de los fluidos macromoleculares es relativamente reciente, pues se inició alrededor de 1950 motivado, por el vertiginoso desarrollo de la industria de los plásticos y posteriormente de los alimentos procesados, y aunque es un campo de investigación muy activo, aún está en proceso de desarrollo.

Una de las diferencias más notables entre los fluidos newtonianos y los macromoleculares es que los últimos tienen "memoria". Esto significa que la deformación del material a un cierto instante de tiempo depende no sólo de los esfuerzos de cizalla aplicados en ese instante, sino también de las deformaciones y esfuerzos de cizalla previos.

Esta característica se observa en un experimento en el que tales fluidos se "bombean" a lo largo de un ducto cilíndrico horizontal. Imaginémos que ponemos ambos fluidos en tubos de vidrio y que, al momento de introducirlos en ellos, agregamos una traza de colorante para poder observarlos fácilmente. Ahora supongamos que seguimos el movimiento del colorante por un tiempo durante el cual lo fotografiamos, y después apagamos la bomba. Primero vemos que la marca inicial de colorante se deforma, pues el fluido se mueve más rápido en el centro del tubo que cerca de sus paredes. Además, notamos que, en el caso del agua, ésta simplemente se detiene al desconectar la bomba, lo que concuerda con lo que, intuitivamente esperamos, esto es, que al desaparecer la causa que produce las deformaciones, el fluido ya no se deforma. Sin embargo, no es esto lo que ocurre en el caso de los fluidos con macromoléculas, donde se observa que aparece un efecto de retroceso, una tendencia a regresar a situaciones previas y gradualmente pasa al estado de reposo. Claramente, esto significa que aún después de haber desconectado la bomba, el fluido macromolecular sigue deformándose, pero ahora en sentido inverso debido a los esfuerzos de cizalla que se produjeron en tiempos anteriores al de detener la bomba. Esta es una manifestación de la memoria del fluido y en reología se le llama efecto de memoria desvaneciente, pues se observa que el fluido no recupera totalmente sus configuraciones previas, lo que significa que la memoria se desvanece (relaja) a medida que el tiempo transcurre. Este efecto se muestra gráficamente en la Figura 2.12, donde los perfiles con líneas oscuras representan, de forma esquemática, el comportamiento del fluido antes de y en el momento de desconectar la bomba (Muller, 1973).

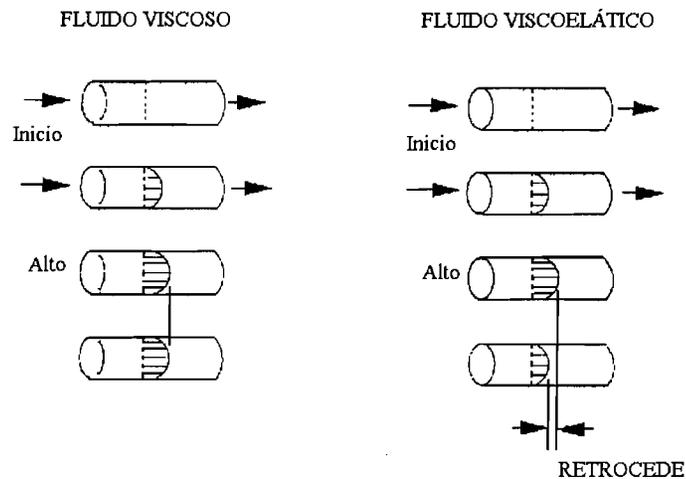


Figura 2.12 Fenómeno de retroceso en fluidos viscosos y viscoelásticos (Steffe, 1996).

Otro efecto un tanto sorprendente es el comportamiento que exhibe un fluido polimérico al emerger de un orificio. En el caso del agua, ésta no se expande ni se contrae, pero un líquido polimérico puede "hincharse" y aumentar su sección transversal ¡hasta por un factor de cinco! de hecho, este efecto podemos observarlo fácilmente al oprimir un tubo de pasta dental (Figura 2.13).

Hay todavía otros efectos, no menos sorprendentes, que son fáciles de observar. Imaginémos que llenamos con agua un tubo relativamente ancho el cual está conectado por uno de sus extremos a otro tubo de diámetro menor, y que dejamos que el agua fluya lentamente del primero al segundo cuando están colocados verticalmente.

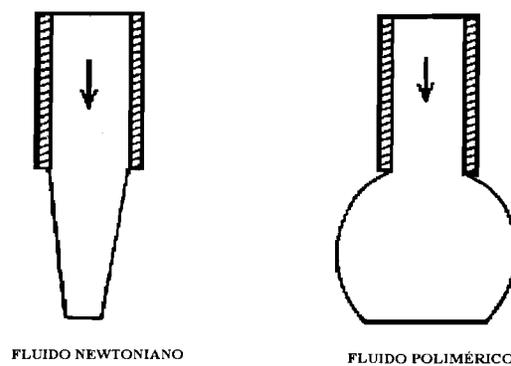


Figura 2.13 Efecto de hinchamiento (Streeter, 1988).

En el caso del agua no vemos otra cosa, aparte de que ésta aumenta su velocidad al pasar al tubo más angosto. En cambio, con el fluido polimérico observamos que se forman pequeños vórtices (remolinos) en la vecindad de la conexión entre ambos tubos. Las partículas de fluido atrapadas en ellos nunca caen al tubo menor. Este efecto se muestra esquemáticamente en la Figura 2.14 (Streeter, 1988).

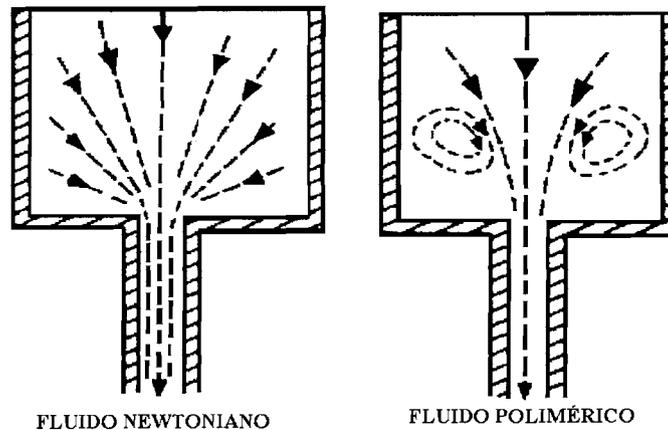


Figura 2.14. Efectos de vórtice a la salida de un recipiente (Streeter, 1988).

Todos estos experimentos ilustran un punto crucial: frente a las mismas causas, la respuesta de un fluido con macromoléculas es cualitativamente diferente a la de un fluido newtoniano. La reología ha comprobado que estas diferencias de comportamiento dinámico pueden entenderse y explicarse cambiando tanto la relación constitutiva lineal de Newton como las ecuaciones de Navier-Stokes.

Existen otros experimentos que claramente indican que el flujo de los fluidos newtonianos es cualitativamente diferente al de aquéllos que contienen macromoléculas y que además constituyen la evidencia de propiedades elásticas en materiales fluidos. A continuación se ilustran gráficamente algunos de ellos, tomando al agua como prototipo de fluido newtoniano.

Todos conocemos el efecto del sifón, lo practicamos al beber un líquido ordinario con un popote: el líquido fluye a través de él en tanto que uno de sus extremos esté dentro del líquido. Para nuestra sorpresa, si en vez de agua tenemos un fluido no newtoniano se observa que el efecto de sifón puede ocurrir aunque el tubo de succión no esté inmerso en él. De modo que un fluido polimérico puede succionarse aún y cuando existan varios centímetros de

separación entre la superficie del fluido y el extremo del tubo. A este efecto se le conoce como sifón sin tubo (Figura 2.15).

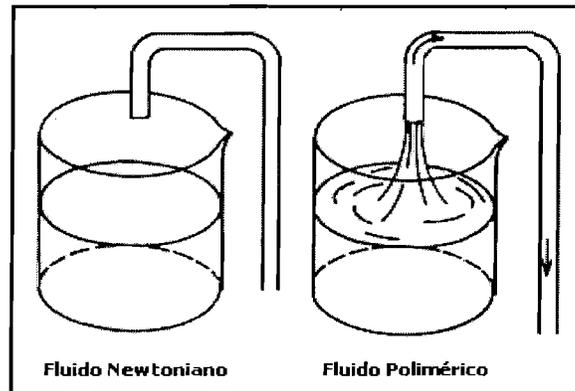


Figura 2.15 Efecto de sifón (Van Vliet, 2001).

En la Figura 2.16 observamos que si ponemos agua en un vaso de precipitados y lo agitamos a una velocidad moderada con un agitador cilíndrico, en la superficie del agua alrededor del agitador se produce una depresión. En realidad el efecto podría haberse anticipado, pues por la acción del agitador el agua también empieza a girar y la fuerza centrífuga tiende a desplazarla hacia las paredes del recipiente. El resultado neto es acumular fluido en las paredes y producir una deficiencia alrededor del cilindro, la cual se manifiesta en la depresión central. Sin embargo, esta explicación intuitiva es inválida si el fluido es polimérico. En este caso sucede precisamente el efecto contrario: el fluido no sólo se concentra alrededor del agitador ¡sino que también trepa por él! A este fenómeno se le conoce como efecto Weissenberg y fue descubierto por Karl Weissenberg en Inglaterra durante la segunda Guerra Mundial (<http://omega.ilce.edu.mx>).

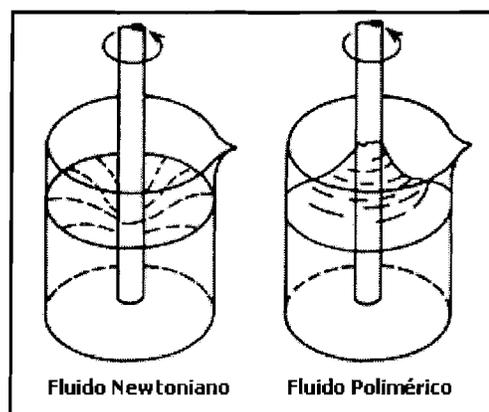


Figura 2.16 Efecto Weissenberg (<http://omega.ilce.edu.mx>).

## 2.5 MATERIALES FLUIDOS Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA

Las propiedades de flujo de un fluido están relacionadas con su estructura interna. A nivel molecular (microscópico) hay diferencias importantes entre los fluidos compuestos por moléculas pequeñas, y los fluidos que contienen proteínas o almidones. Diversas características de la arquitectura macromolecular influyen y determinan sus propiedades de flujo, entre ellas la primera que ya hemos mencionado, es el gran peso molecular de las moléculas que los componen. En segundo término debe señalarse que rara vez los monómeros que componen las macromoléculas tienen el mismo peso molecular, más bien son mezclas que tienen una distribución de pesos moleculares. El hecho es importante, pues se observa que las propiedades reológicas son muy sensibles a esta diversidad de pesos moleculares. Otra característica esencial es que aún sin fluir, las moléculas poliméricas pueden adoptar un número enorme de configuraciones, y como el flujo las altera estirando o alineando las moléculas, los cambios de configuración a su vez influyen en las propiedades de flujo.

En la Figura 2.17 se muestra la relación entre la viscosidad y la velocidad de cizalla, en ésta se trata de ejemplificar lo que está pasando con la estructura interna en relación con el cambio de la viscosidad. En la gráfica existen tres diferentes zonas, limitadas por dos velocidades de cizalla críticas:

$$\dot{\gamma}_1^* \text{ y } \dot{\gamma}_2^*$$

Zona A ( $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_1^*$ ). En esta región las velocidades de cizalla son bajas, las fuerzas hidrodinámicas pueden no ser observadas. Solamente el movimiento Browniano actúa contra las fuerzas de la estructura. Las macromoléculas que están presentes en la fase continua (Cont. Ph) o el material disperso (Disp. Ph.) en un medio continuo (partículas sólidas, gotas de algún líquido o burbujas de gas) son el principal componente estructural de los sistemas alimenticios. Para cada material, hay fuerzas de interacción entre los componentes (enlaces químicos, interacciones físicas como fuerzas de van der Waals, fuerzas electrostáticas e interacciones sólido-líquido, entre otras.), las cuales determinan el comportamiento de la estructura.

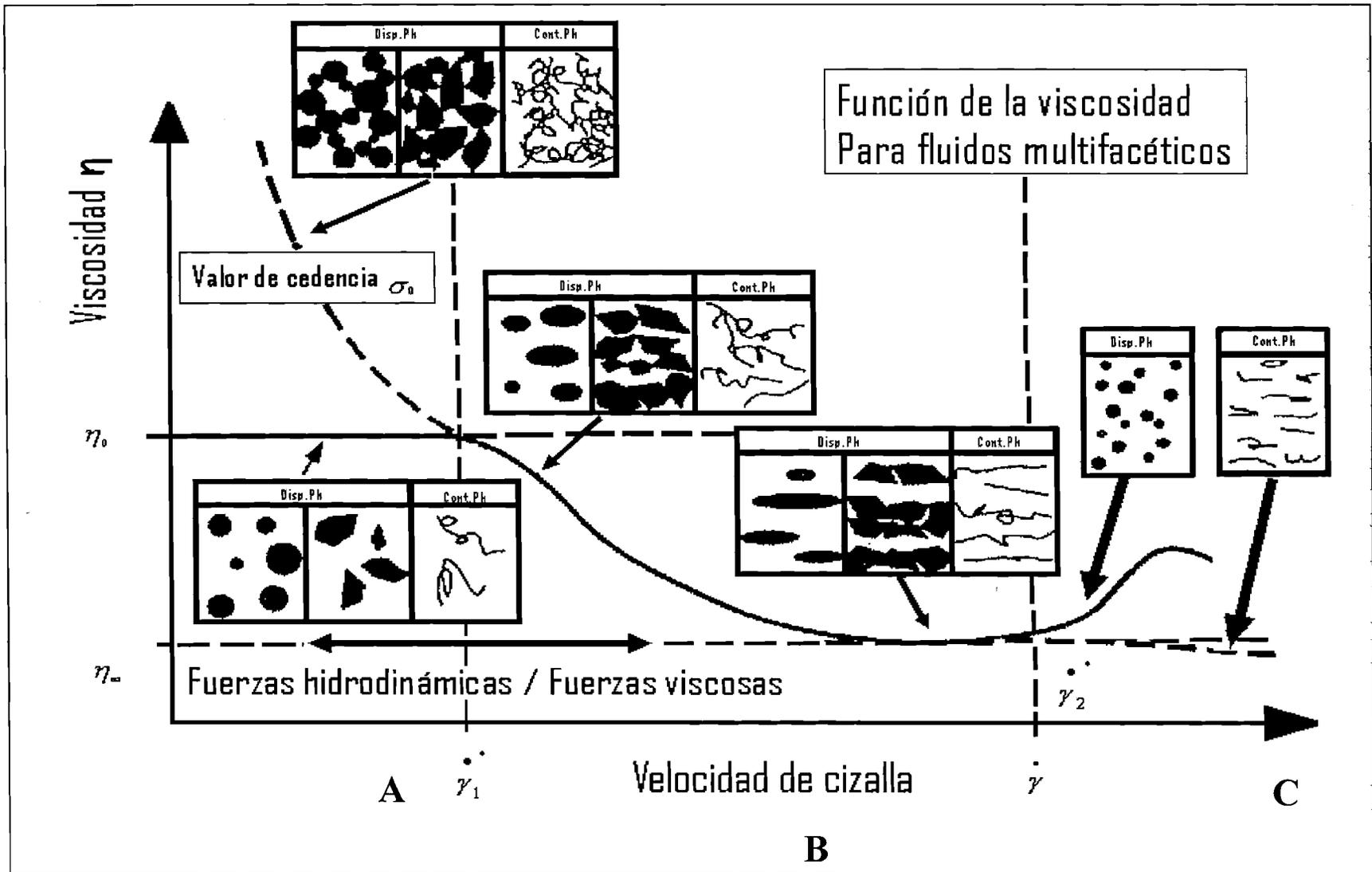


Figura 2.17 Cualidades de las estructuras – relaciones reológicas en estructuras multifacéticas de fluidos (Wihdhab, 1995).

Significado de las abreviaturas de la figura

Disp. Ph : Fase dispersa

Cont. Ph: Fase continúa

Cuando la concentración de macromoléculas en la fase continua es alta, las moléculas forman redes muy enmarañadas cuya configuración cambia con el tiempo y con las condiciones de flujo. Puede uno imaginarse que tal entrecruzamiento dinámico de moléculas poliméricas se asemeja a un barril lleno de serpientes excitadas que se mueven y se enredan entre sí. En esas condiciones, para poder separarse unas de otras las moléculas, como las serpientes, deben "reptar", es decir, deben seguir trayectorias tortuosas, lo que produce una viscosidad grande y dependiente de la longitud del polímero. Esta comparación también permite intuir que los efectos de memoria aparecen porque a las moléculas enmarañadas les toma tiempo ajustarse o responder a la acción de un esfuerzo, por eso su respuesta no es instantánea (Van Vliet, 2001).

Para el caso en que la fase dispersa presenta una concentración alta, las partículas interaccionan de tal forma que, dependiendo del tipo e intensidad de las interacciones que se generen entre ellas, se puede propiciar la formación de agregados. Estas fuerzas de interacción, ya sea de las partículas en la fase dispersa o de las macromoléculas en la fase continua, genera un valor de fluencia ( $\sigma_0$ ). Lo que significa que se debe aplicar una fuerza crítica antes de que el movimiento comience. Esta fuerza puede medirse usando un viscosímetro de preferencia uno en el que se controle el esfuerzo en lugar de la velocidad de cizalla. La viscosidad aparente, la cual es igual a el esfuerzo de cizalla/la velocidad de cizalla es en teoría, infinita.

Para bajas concentraciones de componentes estructurales, el movimiento Browniano determina y conserva una estructura isotrópica con ausencia de interacciones entre partículas o macromoléculas. En este caso, la viscosidad aparente es independiente de la velocidad de cizalla (régimen newtoniano inferior).

Zona B ( $\dot{\gamma}_1^* \leq \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_2^*$ ). En esta región, las fuerzas hidrodinámicas son del mismo orden de magnitud que las fuerzas de la estructura del material. Cuando incrementa la velocidad de cizalla y el movimiento comienza, el esfuerzo de cizalla puede superar a las fuerzas de la estructura, donde las moléculas de la fase continua o las partículas presentes en un sistema disperso se pueden reorientar, desagregar deformar o estirar en dirección del flujo, oponiendo, en consecuencia, menor resistencia a fluir. El efecto reofluidificante es reversible, y al cesar el esfuerzo aplicado, las moléculas vuelven a su situación original y el material recupera su viscosidad inicial. En experimentos reológicos de deformación de

cizalla esto se entiende como que en alguna velocidad de cizalla particular el fluido tomará eventualmente una estructura en equilibrio. En este estado la viscosidad está en equilibrio o en un estado constante y es donde comúnmente se hacen las mediciones de esta propiedad (Van Vliet, 2001). Esto provoca nuevas estructuras de acuerdo al tipo, dirección y tiempo de aplicación de la fuerzas de cizalla. Si este tiempo es lo suficientemente prolongado, se alcanza una estructura en equilibrio. En muchos alimentos, esta estructura en equilibrio tiene una resistencia interna a fluir reducida en comparación con la de la zona A, por lo tanto, la viscosidad se reduce con el aumento de la velocidad de cizalla.

En este caso es donde se presenta el comportamiento fluidificante o pseudoplástico. La estructura inducida puede revertir completa o parcialmente su estado como se encontraba en la zona A si la velocidad de cizalla se reduce de nuevo a bajos valores, o si ésta regresa a un estado de reposo. Partículas deformables como gotas y burbujas llegan a ser deformadas hasta tomar una forma elíptica. Partículas gruesas y sus aglomerados son orientados de acuerdo a su forma. Cuando la máxima orientación de las partículas ocurre, existe una región de viscosidad mínima sobre un intervalo de velocidades de cizalla. Si esta estructura con determinada viscosidad se requiere para un producto o su futuro procesamiento, este estado de orientación de las partículas debe mantenerse a través de métodos físicos y/o químicos.

Zona C ( $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_2^*$ ). Si la segunda velocidad de cizalla crítica  $\dot{\gamma}_2^*$  se excede, el estado de orientación máxima puede ser desordenado. Este desorden puede ser el resultado del flujo inestable, interacciones partícula-partícula (en partículas gruesas principalmente) o cambios en la estructura de las partículas (rompimiento de burbujas o gotas, conduciendo al aumento de la dispersión). Con estos cambios la resistencia al flujo y la viscosidad pueden incrementarse de nuevo. Estos cambios son llamados dilatación. En esta región las macromoléculas de la solución pueden comportarse completamente diferente según el sistema particular que se estudie. Habiendo sido completamente alineados, estructuras moleculares débiles pueden romperse y causar un decremento posterior en la viscosidad. Degradaciones moleculares no se presentan en sistemas puros.

La existencia de tres velocidades de cizalla dominantes A, B y C, ha sido comprobada experimentalmente. Emulsiones concentradas (mayonesa) y suspensiones (chocolates),

tanto como sistemas de espuma (mousse) podrían mostrar comportamiento viscoso similar (Windhab, 1995).

**CAPÍTULO 3**  
**VISCOELASTICIDAD**

### 3.1 VISCOELASTICIDAD

El término viscoelasticidad significa la coexistencia de propiedades viscosas y elásticas en un material. Estas propiedades se pueden observar sólo bajo condiciones particulares, involucrando el tipo de deformación y el tiempo de observación. Dependiendo de estas condiciones, un mismo material puede mostrar diferentes comportamientos (Barnes y col., 1989).

Las propiedades viscoelásticas de un material pueden ser descritas por viscoelasticidad lineal y no lineal. Las propiedades de un material viscoelástico lineal dependen sólo del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo o la deformación aplicados. Esto significa que la relación esfuerzo-deformación y su derivada con el tiempo siempre es lineal, sin importar sus magnitudes. Por el contrario, el comportamiento no lineal significa que las propiedades viscoelásticas del material son una función no sólo del tiempo sino también de la magnitud del esfuerzo y la deformación aplicada.

#### 3.1.1 Viscoelasticidad lineal

La mayoría de las mediciones viscoelásticas se realizan en la región lineal, la viscoelasticidad lineal se ha estudiado en mayor medida por varias razones (Tecante, 2005; Barnes y col., 1989):

1. La matemática es mucho más simple. En la teoría de la viscoelasticidad lineal las ecuaciones diferenciales son lineales y los coeficientes de las diferenciales de tiempo son constantes; estas constantes representan funciones del material tal como la viscosidad o el módulo elástico.
2. Las características macromoleculares de un material dado se pueden interpretar correlacionándolas con su respuesta reológica, la cual se determina bajo condiciones donde el esfuerzo o la deformación son suficientemente pequeños para que el material no modifique significativamente su estado de equilibrio.
3. La viscoelasticidad lineal proporciona las bases para la viscoelasticidad no lineal.
4. Muchas situaciones de ingeniería ocurren bajo condiciones de flujo inestable, en las cuales la respuesta elástica del material se vuelve importante.

La teoría matemática de la viscoelasticidad lineal se basa en el principio de superposición de Boltzman el cual plantea que existe una proporcionalidad directa a cualquier tiempo entre la perturbación ejercida sobre el material y su respuesta resultante. Si la perturbación es el esfuerzo, la respuesta es la deformación, y viceversa. En la práctica, es necesario determinar la zona lineal del comportamiento viscoelástico, la cual en algunos casos se localiza a esfuerzos o deformaciones extremadamente bajas, donde los datos son difíciles de obtener (Morrison y Ross, 2002).

### 3.2 MÉTODOS EXPERIMENTALES DE MEDIDA

Existen pruebas donde se puede aplicar el estudio viscoelástico de los materiales para determinar la relación entre el esfuerzo, así como la deformación y el tiempo de respuesta. Estas se dividen en dos grandes categorías: métodos estáticos y métodos dinámicos. Los métodos estáticos incluyen las pruebas de fluencia (“Creep”) y las de relajación de esfuerzos. En éstos, la variable aplicada permanece constante con el tiempo. Por otro lado, en los métodos dinámicos, la aplicación del esfuerzo o la deformación se realiza de manera armónica, (sinusoidalmente) con el tiempo. Estas son llamadas pruebas oscilatorias de pequeña amplitud, debido a que emplean pequeñas deformaciones con el fin de mantener un comportamiento viscoelástico lineal.

#### 3.2.1 Métodos estáticos

Dentro de las pruebas más importantes se incluyen las de fluencia y las de relajación de esfuerzos. En la primera, se aplica un esfuerzo (par de torsión) constante durante un cierto tiempo y se mide la deformación producida en función del tiempo. En las pruebas de relajación de esfuerzos, se aplica una deformación que se mantiene constante durante cierto tiempo y se cuantifica el esfuerzo requerido para mantener la deformación, en función del tiempo (Lapasin y Pricl, 1992, Steffe, 1992).

##### Relajación de esfuerzos

Las pruebas de relajación de esfuerzos se pueden realizar bajo condiciones de compresión o tensión. Este tipo de pruebas involucra la aplicación de una deformación instantánea a

un material. Las pruebas de relajación de esfuerzos comúnmente se realizan en máquinas universales, las cuales permiten comprimir la muestra y lograr una particular deformación y después parar. La deformación constante es por lo tanto mantenida y se registra la forma en que la muestra intenta liberar el esfuerzo impuesto (Rao y Steffe, 1996), pudiéndose observar un gran intervalo de comportamientos en esta prueba (Figura 3.1). Para un material puramente elástico, el esfuerzo permanece constante con el tiempo, no se observa relajación, mientras que una sustancia líquida ideal relajará instantáneamente. Los materiales viscoelásticos pueden relajar de manera gradual, a un punto final dependiendo de la estructura molecular del material que está siendo evaluado. Si el valor límite no es cero, podemos nombrar al material como sólido viscoelástico, pero si el esfuerzo es finito durante la deformación y cero para todos los tiempos positivos o se aproxima lo suficientemente rápido a cero, podremos decir que se trata de una material líquido viscoelástico.

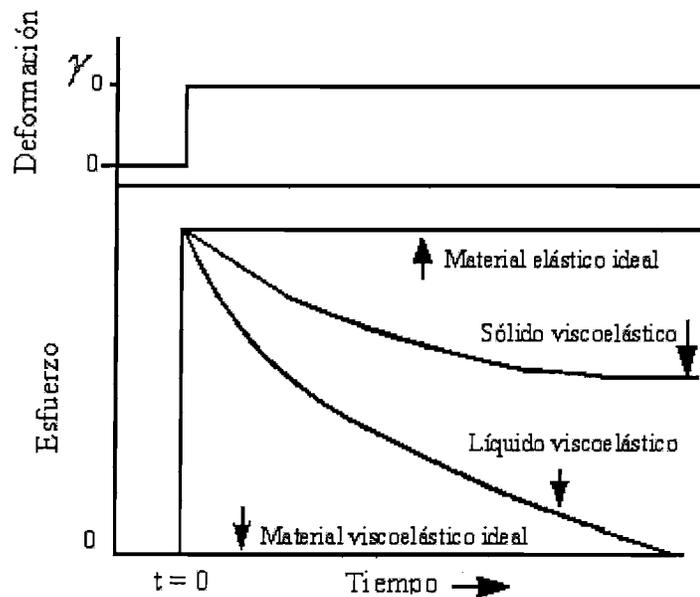


Figura 3.1 Curvas de relajación de esfuerzos (Steffe, 1996).

La distinción entre sólido y fluido es usualmente hecha en base a una comparación subjetiva del tiempo de relajación y del tiempo de observación. Por ejemplo, a temperatura ambiente un vidrio es un líquido sub-enfriado, a menos de que uno esté interesado en el tiempo hablando de siglos, éste se puede considerar como un sólido.

En un experimento de relajación de esfuerzos bajo una prueba de cizalla, el tiempo de relajación ( $\lambda$ ) puede ser tan corto, que éste escape de la observación y el experimentador

concluya que se trata de un sólido o un líquido perfectamente elástico, según sea el caso. Si  $\lambda$  es lo suficientemente largo que el esfuerzo de relajación se pueda observar durante la experimentación, nuevamente el observador podría concluir que el material es perfectamente elástico (Tanner, 1988).

Los datos de esfuerzos de relajación comúnmente se presentan en términos del módulo de relajación de esfuerzos:

$$Gf(t) = \frac{\sigma}{\gamma_0} \quad (3.1)$$

Si un material es perfectamente elástico, el módulo de relajación es igual al módulo de cizalla.

$$G = \frac{\sigma}{\gamma} \quad (3.2)$$

$G(t)$  es una cantidad similar, pero dependiente del tiempo, determinada de datos experimentales.

### Pruebas de fluencia

La técnica de fluencia (deformación relativa al esfuerzo es función del tiempo) “creep compliance”, aporta información asociada básicamente a la estructura molecular y composición química de los alimentos. Esta información nos da una idea de las características estructurales del sistema y de los cambios que éstos pueden experimentar y se centra principalmente en la representación de sus comportamientos mecánicos a través de los modelos teóricos disponibles. Se caracteriza por ser un método no destructivo que permite distinguir entre materiales sólidos, líquidos y viscoelásticos, cuyas curvas idealizadas se muestran en la Figura 3.2. Para el caso de un material sólido ideal, sujeto a un esfuerzo constante, la deformación será constante y el material regresará a su forma original, una vez retirado el esfuerzo. Un material líquido ideal puede mostrar flujo estacionario, produciendo una respuesta lineal al esfuerzo sin la capacidad de recuperar nada de la deformación generada. En el caso de los materiales viscoelásticos (masa para pan, por ejemplo), éstos pueden exhibir una respuesta no lineal a la deformación y debido a su habilidad para recuperar su estructura almacenando energía, muestran una

deformación permanente menor que la deformación total generada en la muestra.

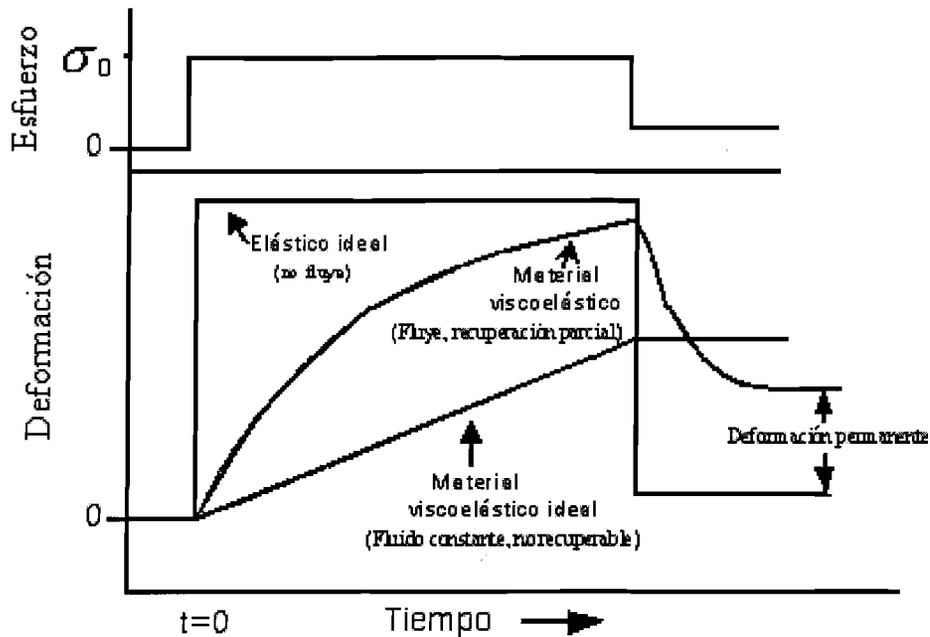


Figura 3.2 Curvas idealizadas de fluencia (Steffe, 1996)

Los datos de las pruebas de fluencia pueden ser descritos en términos de una función material conocida como capacitancia de fluencia o deformación relativa al esfuerzo,  $J$  ("creep compliance"). En caso de un material sólido ideal la deformación instantánea permanece constante con el tiempo, por lo que se tiene:

$$J = \frac{\gamma_0}{\sigma_0} = \frac{1}{G} \quad (3.3)$$

donde  $G$  es el módulo elástico. En el caso del líquido ideal, la deformación incrementa a una velocidad constante por lo que  $J$  es una función lineal del tiempo:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0} = \frac{t}{\eta} \quad (3.4)$$

donde  $\eta$  es la viscosidad del fluido.

Dentro de las aplicaciones de las pruebas de fluencia y relajación de esfuerzos, además de determinar el comportamiento elástico, viscoso o viscoelástico de un alimento, destacan (Schramm, 1994):

- Determinan el esfuerzo inicial que necesita un fluido viscoso, también de un polímero de baja concentración como de disoluciones concentradas de polisacáridos y proteínas con velocidades extremadamente bajas.
- Realizan simulaciones semejantes a procesos físicos de sedimentación.
- Ayudan a la localización de la regeneración característica de fluidos tixotrópicos, tanto como de puntos después de un pre-cizallamiento.

### 3.2.2 Pruebas dinámicas

Las pruebas dinámicas son conocidas como pruebas de cizalla oscilatoria de pequeña amplitud, (“small amplitude oscillatory shear” o SAOS, por sus siglas en inglés), debido a que deformaciones pequeñas son empleadas para mantener un comportamiento viscoelástico lineal. En estas pruebas la muestra se somete a un movimiento oscilatorio sinusoidal causando algunos niveles de esfuerzos que son transmitidos a través del material. El esfuerzo o la deformación oscilan sinusoidalmente con el tiempo, con una frecuencia angular,  $\omega$ . Los ensayos dinámicos son muy adecuados para la caracterización con el tiempo de materiales viscoelásticos no alterados. Ambos componentes, el elástico y el viscoso, se pueden obtener en un amplio intervalo de escalas de tiempo que se puede variar mediante la variación de la frecuencia angular (la escala de tiempo del experimento es aproximadamente  $1/\omega$ ). Para este fin son útiles los reómetros con geometría de doble placa, cono y placa y los cilindros concéntricos, colocándose el fluido de prueba en el espacio existente entre la unidad de medición (Van Vliet, 2001).

Considerando una deformación armónica por cizalla,  $\gamma$ , de amplitud del esfuerzo  $\sigma_0$ , la cual está desplazada en fase con la deformación de cizalla en un ángulo  $\delta$ . La deformación armónica de cizalla se origina en uno de los elementos y la tensión de cizalla correspondiente se detecta por el otro elemento.

Cuando la deformación ( $\gamma$ ) varía con el tiempo de acuerdo a la relación:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen}\omega t \tag{3.5}$$

Donde:  $\gamma_0$  es la amplitud de la deformación, el esfuerzo correspondiente,  $\sigma$  puede ser representado como la suma de los componentes que son: en fase con la deformación (Figura 3.3) y  $90^\circ$  fuera de la fase con la deformación (Figura 3.4).

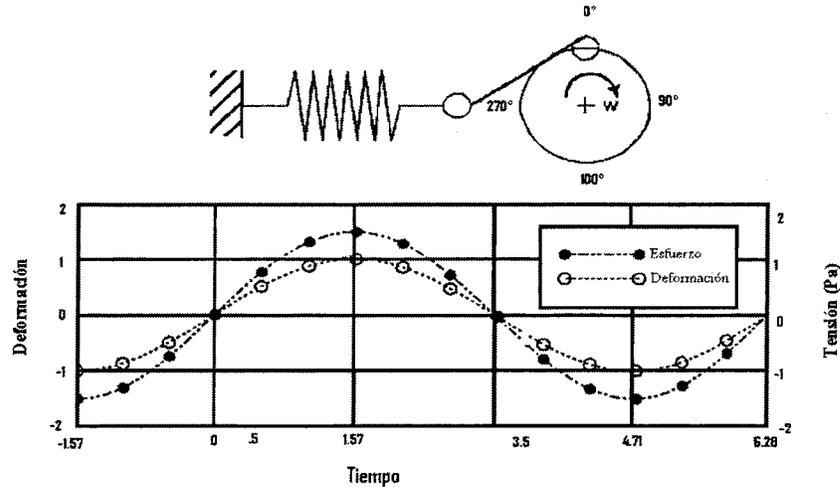


Figura 3.3 Prueba dinámica: Esfuerzo impuesto y deformación obtenida de un sólido (Shramm, 1994).

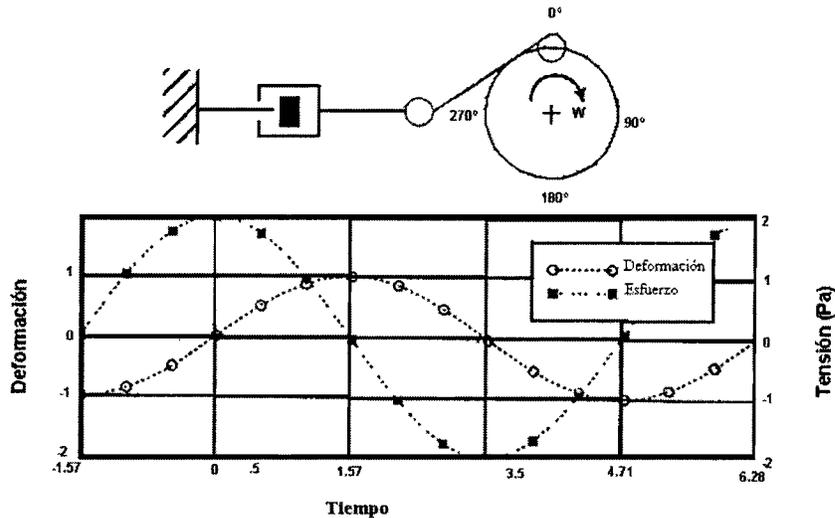


Figura 3.4 Prueba dinámica: Tensión impuesta y respuesta de deformación de un líquido newtoniano (Shramm, 1994).

Denotando el ángulo de fase para el cual el log del esfuerzo es  $\delta$ , el esfuerzo correspondiente puede ser expresado como:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \tag{3.6}$$

Donde  $\sigma_0$  es la amplitud del esfuerzo, con esto obtenemos:

$$G'(\omega) = \left( \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right) \cos \delta \quad (3.7)$$

$$G''(\omega) = \left( \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right) \sin \delta \quad (3.8)$$

Donde,  $G'(\omega)$  y  $G''(\omega)$  son el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida, respectivamente. El primero es una medida de la energía almacenada por ciclo y el segundo es una medida de la energía disipada como calor. Por lo tanto, para un sólido perfectamente elástico, toda la energía es almacenada,  $G''$  es cero y el esfuerzo y la deformación están en fase. En contraste, para un líquido con propiedades no elásticas toda la energía es disipada como calor,  $G'$  es cero y el esfuerzo y la deformación se encuentran fuera de fase  $90^\circ$  (Steffe, 1996).

También se puede emplear notación compleja y definir módulos complejos  $G^*(\omega)$

$$|G^*| = \left( G'^2 + G''^2 \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

Donde  $G^*$  es el módulo complejo, el cual incluye la información completa de las propiedades viscoelásticas del material bajo una deformación de cizalla controlada.

De similar forma la viscosidad dinámica y la rigidez dinámica son componentes de la viscosidad dinámica compleja,  $\eta^*$

$$\eta^* = \eta' - \left( i \frac{G'}{\omega} \right) \quad (3.10)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de la oscilación; la parte imaginaria de la viscosidad compleja

es igual a  $i \left( \frac{G'}{\omega} \right)$ .

Otra función importante empleada para describir el comportamiento viscoelástico es la tangente de la fase de cambio (llamada tangente delta), la cual es también una función de la frecuencia:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (3.11)$$

Si el material se comporta como una sustancia viscosa (material newtoniano), el esfuerzo y la deformación se encuentran  $90^\circ$  fuera de fase y  $\delta = \frac{\pi}{2}$ .  $G'$  y  $\eta''$  son cero puesto que el material no almacena energía.  $\eta'$ , sin embargo, es constante e igual a la viscosidad newtoniana ( $\eta$ ).

Las pruebas oscilatorias proporcionan datos acerca de un amplio intervalo de frecuencias; sin embargo, si parámetros fundamentales son requeridos, éstos deben ser restringidos para un comportamiento viscoelástico lineal. Esto puede ser verificado con una muestra, sometiéndola a un incremento de la amplitud de oscilación, que puede ser un barrido de deformación o de esfuerzos, dependiendo del tipo de reómetro que se emplee (Figura 3.5).

Si la amplitud de la deformación y esfuerzo se encuentran dentro de la zona de viscoelasticidad lineal (Figura 3.5), los parámetros viscoelásticos pueden ser determinados en función de la frecuencia y de las medidas de las amplitudes de deformación y esfuerzo asociados a la fase logarítmica.

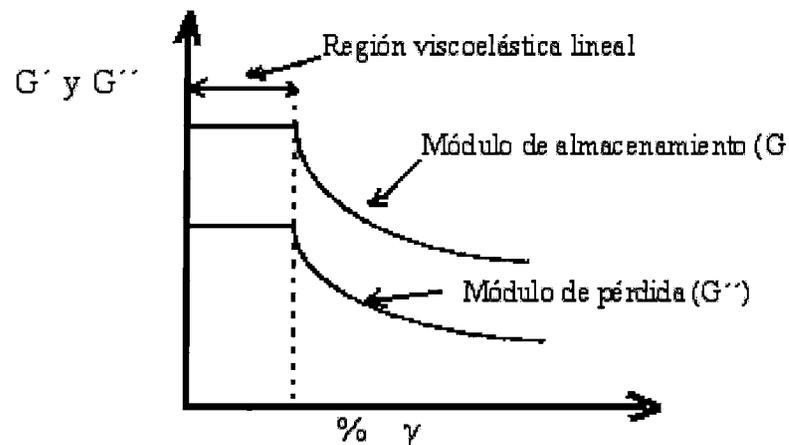


Figura 3.5 Respuesta típica a un barrido de deformación mostrando la región viscoelástica lineal (Steffe, 1996)

Una solución, un gel y una solución concentrada muestran distinto comportamiento frente a un barrido de frecuencia (Figura 3.5). Con una solución diluida,  $G''$  es más grande que  $G'$  sobre todo el intervalo de frecuencias utilizado. Las curvas de  $G''$  y  $G'$  se interceptan exactamente a la mitad del intervalo de frecuencia para soluciones concentradas mostrando una clara tendencia hacia el comportamiento de un sólido a altas frecuencias  $G'$  es significativamente mayor que  $G''$  durante todo el intervalo de frecuencias para el gel (Schramm, 1994).

Es importante enfatizar que si  $G'$  es más grande que  $G''$ , el material puede tener comportamiento de sólido, la deformación puede ser esencialmente elástica o recuperable. Sin embargo, si  $G''$  es mucho más grande que  $G'$  la energía usada para deformar el material es disipado viscosamente. El módulo viscoelástico determinado por encima de un intervalo de frecuencias indican zonas de transición correspondientes a procesos de relajación dependientes de las estructuras de los materiales.

#### Ejemplo de la relación de $G'$ y $G''$ con la estructura de una sustancia

Los materiales viscoelásticos presentan diferentes espectros mecánicos los cuales se pueden resumir en los siguientes (Mezger, 1990):

1. Materiales viscoelásticos sin uniones químicas. Sustancias con bajo peso molecular y distribución uniforme del peso molecular, y moléculas lineales de cadena corta con pocos entrecruzamientos físicos. Para tales fluidos viscoelásticos, se recurre al modelo de Maxwell (el arreglo en serie del resorte y amortiguador), la siguiente interacción se aplica a:

$$G'(\omega) = G_1 \left( \frac{\omega^2 t_R^2}{1 + \omega^2 \sigma_R^2} \right) \quad (3.12)$$

$$G''(\omega) = G_1 \left( \frac{\omega t_R}{1 + \omega^2 \sigma_R^2} \right) \quad (3.13)$$

Donde:

$G_1$  = valor de la meseta (Pa)

$t_R$  = Tiempo de relajación ( s )

$\omega$  = Frecuencia angular (Hz)

$G'$  = Módulo de almacenamiento (Pa)

$G''$  = Módulo de pérdida (Pa)

A frecuencias bajas  $G'' > G'$ , el comportamiento se invierte a frecuencias altas.

En el diagrama de doble logaritmo (Figura 3.6), para frecuencias pequeñas ( $\omega \rightarrow 0 \text{ s}^{-1}$ ) la curva  $G'(\omega)$  tiene una inclinación 2:1 porque  $G' \sim \omega^2$  aplica. Para frecuencias grandes la curva  $G'(\omega \rightarrow \text{s}^{-1})$  alcanza un valor de meseta constante  $G_1$ . En contraste en la curva de  $G''(\omega)$  a frecuencias pequeñas ( $\omega \rightarrow \text{s}^{-1}$ ) la inclinación 1:1 porque  $G'' \sim \omega^2$  aplica. En el punto  $\omega$ ,  $t_R=1$  la curva  $G''(\omega)$  alcanza un valor máximo con  $G'' \text{ max} = G_1/2$ , la mitad del valor de meseta en la curva  $G'$ . Para altas frecuencias ( $\omega \rightarrow \infty$ ) la curva  $G''(\omega)$  decrece con una pendiente de 1:1.

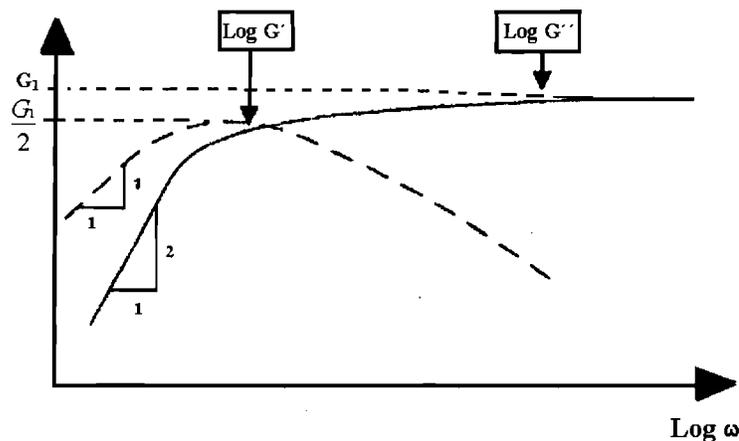


Figura 3.6 Ejemplo de un espectro mecánico de una sustancia de bajo peso molecular (Mezger, 1990)

Los fluidos viscoelásticos sin enlaces cruzados pueden ser caracterizados en un intervalo de frecuencias bajas con el modelo de Maxwell.

2. Sustancias con alto peso molecular y amplia distribución del peso molecular. En la mayoría de los polímeros entrecruzados además de poseer moléculas de cadena corta se

encuentran también cadenas largas lineales o ramificadas. Las grandes moléculas pueden lograr enredarse y engancharse y formar redes temporales. Estos enlaces pueden deberse a fuerzas de interacción física que dan lugar a entrecruzamientos (enlaces secundarios) y enlaces químicos fijos (valencias primarias). Con pequeños movimientos, estas moléculas tienen la posibilidad de deslizarse lentamente unas sobre otras (Figura 3.7).

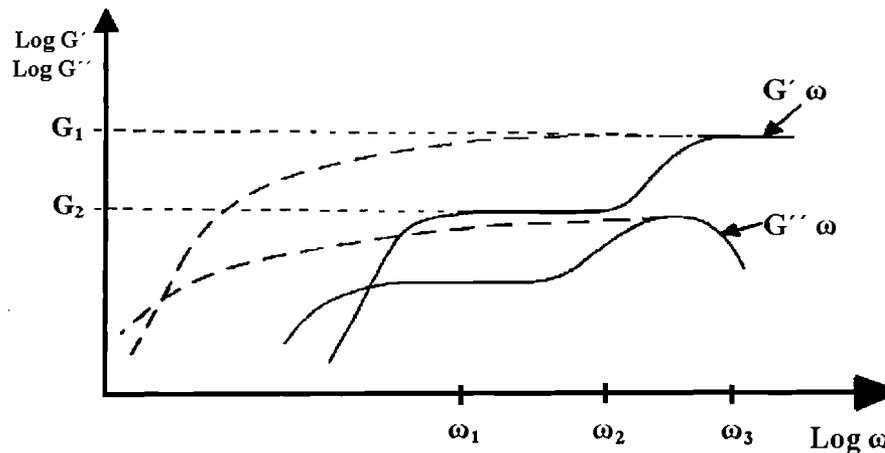


Figura 3.7 Espectro mecánico de sustancias de alto peso molecular (Mezger, 1990).

- Sustancias con dos fracciones con diferencia muy marcada de peso molecular, cadena con una distribución del peso molecular muy cerrada (con dos niveles de meseta).  
 - - - - - Sustancias con una amplia distribución de peso molecular.

$G_1$  Valor de la meseta (transición vítrea)

$G_2$  Valor de la meseta de elasticidad de hule ó goma.

Se distinguen dos rangos:

$\omega \leq \omega_1$  = intervalo inicial (flujo zona 1)

$\omega_1 \text{ a } \omega_2$  = intervalo de elasticidad de hule (meseta  $G_2$ )

$\omega_2 \text{ a } \omega_3$  = intervalo de transición (flujo zona 2)

$\geq \omega_3$  = intervalo vítreo (meseta  $G_1$ )

Generalmente, tiene las siguientes interpretaciones:

- Un alto valor en la meseta,  $G_1$ , indica una estructura fuerte (ejemplo dos o más fuerzas que interaccionan entre macromoléculas largas).
- Una subida temprana a frecuencias pequeñas indica mayores tiempos de relajación

de la muestra. Por eso un desplazamiento de la curva ascendente hacia la derecha indica macromoléculas pequeñas poco ramificadas.

- Una subida con pendiente pronunciada describe una distribución cerrada del peso molecular (limitado espectro de tiempos de relajación). Entre mayor sea la distribución de pesos moleculares largos y mayor la porción de pesos moleculares bajos, mayor la dispersión de tiempos de relajación. Esto se muestra en menor pendiente de la curva  $G'(\omega)$  y en un punto máximo de la curva  $G''(\omega)$  menos marcado.
- Con un incremento en el peso molecular promedio, la posición del punto sobre los cruces de las dos curvas  $G'(\omega)$  y  $G''(\omega)$  se mueve a la izquierda en una línea paralela al eje de la frecuencia.

3. Sustancias viscoelásticas con entrecruzamientos químicos. Aquí son consideradas sustancias que tienen cruce de enlaces químicos entre macromoléculas, estos puentes de redes son fijos con verdaderas uniones químicas (principalmente valencias primarias). Esto tiene la consecuencia de que no es posible que las cadenas se resbalen unas sobre otras sin destruir las redes, porque éstas están fijas en los puntos de unión de la red. Dependiendo de la separación de las uniones de la red es posible una limitada deformación de la muestra, con una red separada, por ejemplo, en la masa ocurre una deformación mayor, y con una red apretada (geles con cadenas esterificadas) sólo son posibles deformaciones pequeñas (Figura 3.8).

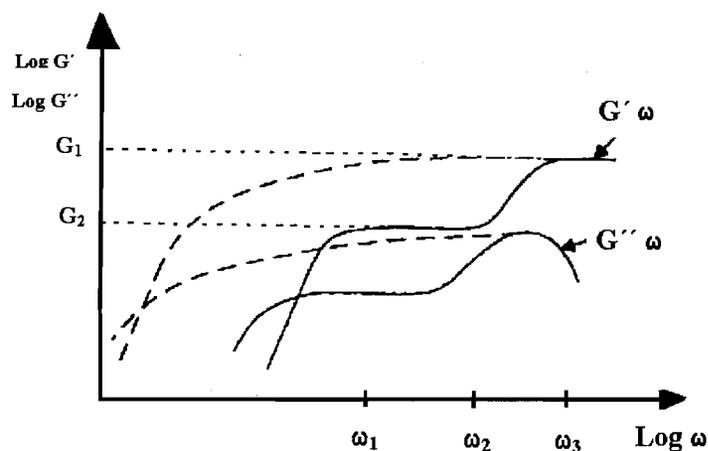


Figura 3.8 Espectro mecánico de sustancias con redes esterificadas (Mezger, 1990).

————— Sustancias con enlaces cruzados parcialmente  
 - - - - - Sustancias con enlaces totalmente entrecruzados.

Las sustancias con enlaces totalmente entrecruzados no pueden ser deformadas más, sin ser destruidas. El material muestra un módulo de almacenamiento,  $G'$ , independiente de la frecuencia, y el módulo de pérdida,  $G''$ , tiene el valor de cero. En sustancias con enlaces total o parcialmente entrecruzado,  $G''(\omega)$  no toma el valor cero a frecuencias pequeñas.

### 3.3 Modelos mecánicos de viscoelasticidad lineal

Existen arreglos que permiten la descripción de las propiedades reológicas de los sistemas alimenticios. Tal es el caso de los modelos mecánicos de Maxwell y de Kelvin los cuales representan modelos viscoelásticos lineales simples. Los modelos mecánicos que representan a los materiales viscoelásticos son el resultado de la combinación de diferentes arreglos (serie o paralelo) de varios elementos elásticos y viscosos (Rao y Steffe, 1996). Estos modelos mecánicos, compuestos de resortes y amortiguadores son empleados en la conceptualización de modelos reológicos. De tal forma que el resorte representa un elemento sólido ideal que obedece a la ley de Hooke, mientras que el amortiguador representa a un elemento fluido ideal que obedece la ley de Newton. El resorte y el amortiguador pueden estar conectados de varias formas para representar el comportamiento de materiales viscoelásticos.

Acoplados en paralelo representan un sólido viscoelástico cuyo modelo suele denominarse modelo de Kelvin y acoplados en serie representan a un líquido el cual se conoce como modelo Maxwell. Ambos modelos pueden acoplarse a su vez en serie para dar otro modelo cuyas características representan el comportamiento viscoelástico de diversos productos alimenticios, el llamado modelo de Burgers.

#### Modelo de Kelvin

El modelo de Kelvin resulta de la combinación en paralelo de un resorte y un amortiguador (Figura 3.9) En este modelo, el esfuerzo total es igual a la suma de los esfuerzos de cada elemento:

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_V \quad (3.14)$$

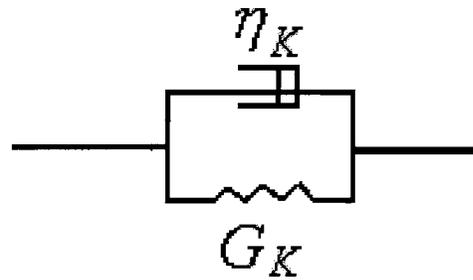


Figura 3.9 Cuerpo sólido viscoelástico (kelvin-Voigt) (Rao y Steffe, 1992).

Una combinación de las ecuaciones (2.2) y (2.5) produce el modelo de Kelvin (algunas veces llamado también Kelvin-Voigt):

$$\sigma = G\gamma + \eta \dot{\gamma} \quad (3.15)$$

Esta es una ecuación diferencial para la deformación donde la solución proporciona la variación de la deformación con el tiempo.

El resorte tiene un módulo constante,  $G$ , y el amortiguador tiene una constante de viscosidad,  $\eta$ . El sistema asegura que la deformación aplicada al sistema resulta la misma que la aplicada al amortiguador  $\gamma_v$  y la que se aplica al resorte  $\gamma_E$ .

#### El modelo de Maxwell

Resulta de la combinación de un elemento elástico y de uno viscoso dispuestos en serie (Figura 3.10). Lo cual tiene como consecuencia que el esfuerzo de cizalla en ambos elementos es siempre idéntico y la deformación se suma:

$$\sigma = \sigma_v = \sigma_E \quad (3.16)$$

$$\gamma = \gamma_v + \gamma_E \quad (3.17)$$



Figura 3.10 Cuerpo líquido viscoelástico (Maxwell) (Rao y Steffe, 1992).

La derivada de la deformación es:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_v}{dt} + \frac{d\gamma_E}{dt} \quad (3.18)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{G} \frac{d\sigma}{dt} \quad (3.19)$$

Esta ecuación diferencial tiene la siguiente solución:

$$\gamma(t) = \left( \frac{\sigma_0}{\eta} \right) \cdot t + \frac{\sigma_0}{G} \quad (3.20)$$

El modelo de Maxwell caracteriza a un líquido viscoelástico. Este modelo reacciona primero con una deformación instantánea después incrementa la deformación de acuerdo con la respuesta del elemento elástico. En la fase final de la prueba, el fluido muestra una respuesta viscosa, la deformación es ilimitada durante la aplicación del esfuerzo y el cizallamiento se incrementa a velocidad constante relacionada con la viscosidad del líquido viscoso (Schramm, 1994).

Algunos comportamientos más complejos pueden ser representados mediante un modelo generalizado de Maxwell, el cual consiste de varios elementos de Maxwell conectados en paralelo (Figura 3.11) (Lapasin y Pricl, 1992).

Cuando este sistema es sometido a una deformación constante, el esfuerzo total es el resultado de la suma de los esfuerzos individuales en cada elemento, donde cada elemento de Maxwell puede tener un tiempo de relajación diferente. Este concepto se puede generalizar para determinar el espectro de relajación en una gran variedad de materiales viscoelásticos (Ferry, 1980).

### Modelo de Burgers

Los modelos anteriores, un sólido viscoelástico y un líquido viscoelástico, son también simples para asumir que materiales reales viscoelásticos pueden ser reológicamente representados por cualquiera de los dos. El modelo de Burgers con un sólido de Kelvin

Voigt y un líquido de Maxwell unidos en serie uno a otro representan materiales reales mucho mejor, representado en la Figura 3.11.

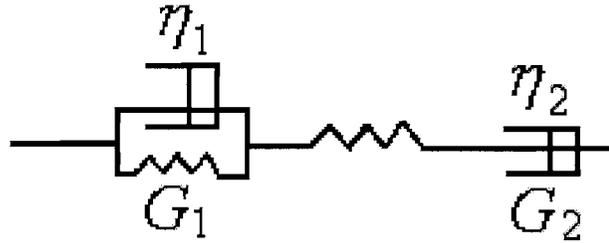


Figura 3.11 Cuerpo viscoelástico (Burgers) (Rao y Steffe, 1992).

Estos modelos son formados por dos resortes con los módulos  $G_0$  y  $G_1$  y por dos amortiguadores con las viscosidades  $\eta_0$  y  $\eta_1$ .

Las ecuaciones constitutivas de estado para los componentes en serie son:

$$\sigma_1 = G_1 \gamma_1 + \eta_1 \cdot \frac{d\gamma_1}{dt} \quad \text{Para el sólido de Kelvin-Voigt} \quad (3.21)$$

$$\frac{1}{G_0} \cdot \left( \frac{d\sigma_0}{dt} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_0} = \frac{d\gamma_0}{dt} \quad \text{Para el líquido de Maxwell} \quad (3.22)$$

Cuando estos componentes son colocados en serie el esfuerzo de cada uno será igual al esfuerzo total y la deformación total será igual a la suma de ambos componentes:

$$\sigma = \sigma_0 = \sigma_1 \quad (3.23)$$

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_1 \quad (3.24)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_0}{dt} + \frac{d\gamma_1}{dt} \quad (3.25)$$

**CAPÍTULO 4**  
**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE**  
**LOS MATERIALES**

## 4.1 INSTRUMENTOS REOLÓGICOS

Una gran variedad de instrumentos son actualmente válidos para la evaluación del comportamiento reológico, frecuentemente son empleados viscosímetros y reómetros controlados mediante computadoras. Durante la medición de las propiedades reológicas de los materiales, debe manipularse una de las variables involucradas (esfuerzo, deformación o tiempo) y medirse como respuesta otra manteniendo la tercera constante. Muchos laboratorios de control de calidad utilizan instrumentos robustos, simples y baratos, los cuales les permiten ejecutar sus análisis adecuadamente en el día a día. Sin embargo, estos instrumentos pueden tener un intervalo de variables a controlar muy estrecho y no siempre proporcionan una bien definida velocidad de cizalla. Esto los hace ser menos convenientes para las áreas de diseño y desarrollo de nuevos productos.

Desde el punto de vista experimental, los instrumentos reológicos comunes capaces de medir las propiedades reológicas fundamentales de alimentos fluidos y semisólidos se pueden dividir en dos categorías: tipo rotacional y tipo tubo (Steffe, 1996). La mayoría son comercialmente disponibles y su costo varía desde un viscosímetro capilar de vidrio hasta un reómetro rotacional capaz de medir propiedades dinámicas y diferencias de esfuerzos normales. En este manual se hace referencia a los instrumentos con que se dispone en el LEM I, diferenciando los términos de viscosímetro y reómetro de la siguiente forma:

*Viscosímetros:* son instrumentos que permiten estimar la viscosidad en función de la velocidad de cizalla. Miden propiedades de flujo (fluidos). En algunos como el de tipo capilar de vidrio no se puede variar la velocidad de cizalla por lo que sólo son útiles para fluidos newtonianos (Bourne, 1982).

*Reómetros:* son instrumentos que además de efectuar pruebas de flujo, permiten evaluar el comportamiento viscoelástico de sólidos, semisólidos y fluidos (pruebas de fluencia, en algunos se pueden realizar pruebas de relajación, y principalmente pruebas oscilatorias). El reómetro moderno consta de tres componentes principales: Un sistema de medición (sensor), un transductor de torsión y un dispositivo de desplazamiento angular. El sistema de medición es particularmente importante, ya que se emplea para generar una determinada deformación en el alimento. En las mediciones reológicas el sistema de medición suele ser intercambiable

y puede seleccionarse de acuerdo al estado físico del material que se mide. Por ello, la elección de este sistema (cono-placa, placas paralelas y cilindros concéntricos) es crítica si se precisan datos reológicos exactos y confiables (Ma. y Barbosa-Cánovas, 1995).

#### 4.1.1 Viscosímetro capilar o de tipo tubo

Estos aparatos sólo son capaces de medir indirectamente en el caso de capilares, la viscosidad  $\eta(\dot{\gamma})$  y en el caso de los tipo tubo la viscosidad  $\eta(\dot{\gamma})$  y la diferencia primaria de esfuerzos normales  $(\sigma_{11} - \sigma_{22})(\dot{\gamma})$ . El intervalo de validez de estos aparatos es para valores de  $\dot{\gamma} > 10 \text{ s}^{-1}$  (García-Rejón, 1981).

En estos viscosímetros se mide el tiempo para un volumen fijo de fluido que pasa a través de un orificio de diámetro pequeño, (una longitud de tubo capilar), a una temperatura constante y controlada. La velocidad de cizalla puede variar entre casi 0 a  $10^6 \text{ s}^{-1}$  cambiando el diámetro del capilar (R) y la presión aplicada (Lapasin y Pricl, 1995).

Un viscosímetro capilar completo consiste de cinco partes esenciales: (1) un depósito para el fluido, (2) un capilar de dimensiones conocidas, (3) una unidad de control y medición de la presión aplicada, (4) una unidad para determinar la velocidad del fluido y (5) una unidad de control de la temperatura. Los viscosímetros capilares son diseñados para hacer uso de la ecuación de Poiseuille, por consiguiente dichos viscosímetros son útiles sólo para fluidos newtonianos. El esfuerzo aplicado puede ser la acción de la gravedad sobre el líquido o un esfuerzo creado por la presión de un gas que empuja al líquido a través del capilar. El instrumento más común de este tipo es el viscosímetro de Ostwald-Ubbelohé (Figura 4.1). Un líquido estándar de densidad y viscosidad conocida es empleado para calibrar el instrumento. Entonces la viscosidad del líquido varía con la temperatura, el instrumento es inmerso en un baño a temperatura constante.

El instrumento (Figura 4.1) es llenado hasta el punto E con un líquido, en esta parte se forma una U. El líquido es después elevado por succión hasta el punto G del capilar. El tiempo  $t$  para

que el líquido se mueva desde  $U_m$  hasta  $l_m$  es medido. Este tiempo es proporcional a la relación de viscosidad y densidad  $\frac{\eta}{\rho}$ . Comparando la viscosidad desconocida 1 con la viscosidad conocida 2 tenemos la siguiente ecuación (Morrison y Ross, 2002):

$$\eta_1 = \eta_2 \left( \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \right) \quad (4.1)$$

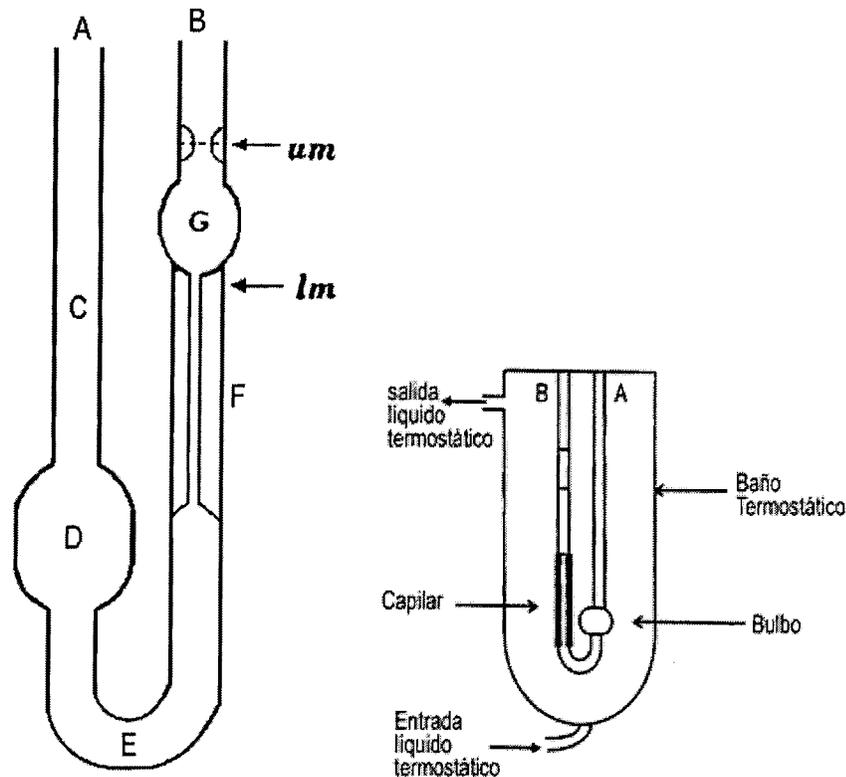


Figura. 4.1 Representación esquemática del viscosímetro de Ostwald (Bourne, 1982).

Este instrumento es útil para líquidos y soluciones simples. Para diferentes intervalos de viscosidad, capilares de diferentes diámetros son empleados.

La ventaja de los viscosímetros capilares es su simplicidad. Todo lo que necesitamos es un viscosímetro, un baño a temperatura constante y un cronómetro. Un conjunto de viscosímetros capilares se debe comprar con diferentes diámetros, los más grandes se

utilizan con fluidos de altas viscosidades. El viscosímetro capilar es el instrumento que también se escoge para fluidos de baja viscosidad particularmente para solventes puros o soluciones diluidas. Estos no son adecuados para dispersiones o emulsiones que comúnmente pueden sedimentar, cremar y flocular en las paredes del capilar. Siempre se debe tener cuidado de que el capilar esté limpio antes de cada medición (Morrison y Ross, 2002).

El tipo de flujo que pasa por un viscosímetro tipo capilar es descrito con la ecuación de Poiseuille, conocida también como la ecuación de Hagen-Poiseuille (Bourne, 1982).

$$\eta = \frac{\pi p r^4 t}{8Vl} \quad (4.2)$$

Donde:  $\eta$  es la viscosidad,  $p$  es la presión sobre la columna del líquido,  $r$  es el radio del capilar,  $t$  es el tiempo que tarda en pasar el volumen fijo de fluido por el capilar de un punto predeterminado a otro punto,  $V$  es el volumen del fluido y  $l$  es la longitud del capilar.

La presión ejercida se genera usualmente por la fuerza de gravedad que actúa sobre la columna del líquido, también puede ser generada por la aplicación de aire comprimido.

Existe una gran variedad de viscosímetros dentro del tipo capilar, los cuales son básicamente modificaciones del viscosímetro original de Ostwald; cada uno de estos tiene especificaciones de operación que varían y un nombre específico, aunque el principio de operación es el mismo. Entre las desventajas o inconvenientes de utilizar este tipo de viscosímetros podemos mencionar lo siguiente: la necesidad de efectuar correcciones para obtener la viscosidad verdadera, el problema de degradación del material por disipación viscosa, entre otros (Lapasin y Pricl, 1995).

#### A) Viscosímetro de Ostwald

Forma de operar:

Un volumen Standard de fluido es pipeteado dentro del viscosímetro (Figura 4.1) por la parte A, sostenido éste en un plano vertical, el fluido pasa por la parte C, D y llega hasta el punto E, en esta parte se forma una U. El viscosímetro con la muestra dentro, es inmerso en un

recipiente con agua a temperatura constante, hasta que estos alcanzan dicha temperatura (aproximadamente 30 minutos). Después se succiona por la parte B, conduciendo de esta manera al fluido hacia la parte G, el menisco debe quedar en la parte superior de la marca  $um$ . La succión es retirada y el fluido fluye desde la parte del bulbo G, hacia la parte F bajo la acción de la fuerza gravitacional. La viscosidad se calcula con los tiempos tomados de lo que tarda en pasar el fluido desde la parte superior de G (Marca  $um$ ), hacia la parte inferior de G (Marca  $lm$ ), estos tiempos son tomados y tratados estadísticamente, para obtener un valor representativo del tiempo y así poder calcular la viscosidad con la ecuación de Poiseuille. Cabe destacar que este tipo de viscosímetros no son aptos para realizar mediciones de viscosidad en fluidos no newtonianos (Bourne, 1982).

Para un viscosímetro de este tipo las dimensiones del radio y la longitud del capilar son constantes por lo que el volumen también es constante. La presión manejada  $p$  es proporcional a la hidrostática sobre el fluido y la densidad del fluido. La parte superior decrece conforme cae el líquido en el reservorio G. Variaciones en la presión sobre el líquido no tienen efecto en la medición de la viscosidad de fluidos newtonianos pero sí podría afectar las mediciones de la viscosidad de fluidos no newtonianos, la magnitud de la desviación depende del grado al cual el fluido se desplace con comportamiento newtoniano. Para un fluido newtoniano la presión que se maneja puede ser remplazada por  $h \times g \times \rho$ , donde  $h$  es la altura;  $g$ , es la gravedad y  $\rho$ , es la densidad del fluido. Desde que  $h$  es constante para un viscosímetro dado, la ecuación de Hagen-Poiseuille se puede simplificar a (Bourne, 1982):

$$\eta = K\rho t \quad (4.3)$$

Donde  $K$  es el factor de conversión del instrumento  $\left( \frac{\pi h g r^4}{8Vl} \right)$  y es una constante para cada instrumento. Esta ecuación puede ser reordenada como:

$$\frac{\eta}{\rho} = Kt \quad \text{or} \quad v = Kt \quad (4.4)$$

Con viscosidad cinética  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Por lo tanto la viscosidad cinética  $\nu$  de un fluido es obtenida multiplicando el tiempo del flujo por el factor de conversión del instrumento  $K$ .

Si el factor de conversión del instrumento no es proporcionado o se ha perdido, éste se puede obtener mediante la medición del tiempo del flujo para un fluido de viscosidad conocida:

$$\nu_s = K t_s \quad (4.5)$$

Donde  $\nu_s$  es la viscosidad cinética y  $t_s$  es el tiempo del flujo para un fluido estándar de viscosidad conocida.

Reordenando la ecuación tenemos:

$$K = \frac{\nu_s}{t_s} \quad (4.6)$$

#### 4.1.2 Reómetros y viscosímetros rotacionales

Los instrumentos reológicos comúnmente utilizados son los de tipo rotacional. Dentro de este tipo existen comercialmente muchas variantes que ofrecen diferentes opciones según la aplicación de la medición a efectuar.

En la Figura 4.2 se muestran los dos principales tipos de instrumentos de uso común: el primero es el de control de esfuerzo (CS, por sus siglas en inglés) el cual es aplicado electrónicamente mediante un motor permitiendo con esto la medición de la velocidad de cizalla; y el segundo es el de control de la deformación (CR, por sus siglas en inglés) en donde una deformación es impuesta y el esfuerzo es obtenido a partir de la deformación mediante un resorte calibrado del sistema.

Ambos tipos de instrumentos comúnmente cuentan con un cojinete el cual les permite hacer mediciones a fluidos de baja viscosidad, sin embargo la viscosidad del agua o de algún líquido orgánico simple es lo menos viscoso que se puede analizar en este tipo de instrumentos.

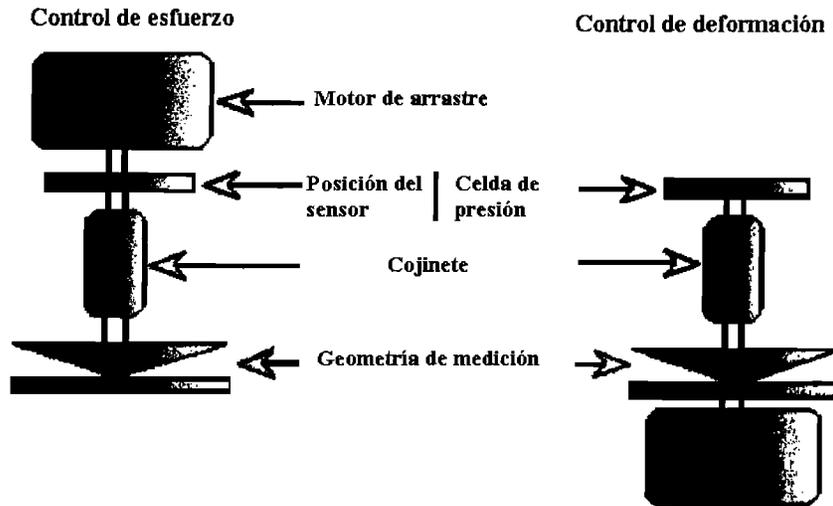


Figura 4.2 Representación esquemática de reómetros. Control computarizado de esfuerzo y temperatura estandarizada (Goodwin y Hughes, 2000).

Los viscosímetros rotacionales pueden tener diversas formas; normalmente se describen en términos de sus sistemas de medida. Los tipos principales son el de cilindros concéntricos, placas paralelas y el de cono y placa (Figura 4.3), pueden ser operados en flujo estacionario (velocidad angular constante) o en modo dinámico (oscilatorio), el principio de funcionamiento es el mismo para ambos.

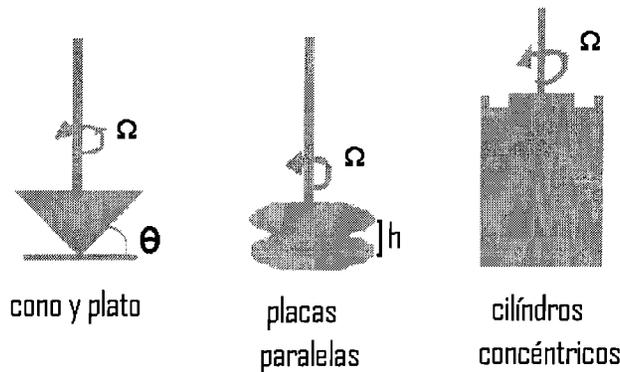


Figura 4.3 Dispositivos rotacionales (<http://www.hemerodigital.unam.mx>).

Los dispositivos rotacionales, se basan en la medición de fuerzas y torques ejercidas por el material de prueba sobre alguna de los diferentes sistemas de medición empleados, tales como cono-plato, placas paralelas, cilindros concéntricos, entre otros. La velocidad de cizalla

se aplica al material por medio de la rotación de alguno de los miembros del aparato. Es característica de los reómetros rotacionales que el material de prueba (muestra) esté contenida en el espacio comprendido entre dos cuerpos de geometría definida (cilindros concéntricos, cono y plato, plato-plato), uno de los cuales gira cizallando la muestra. En estos tipos de sistemas de medida, se tienen condiciones que producen el mismo resultado que las placas paralelas infinitas de la ley de Newton, de manera que los resultados de esfuerzo, velocidad de cizalla y viscosidad están en las unidades físicas apropiadas. Los instrumentos rotacionales básicamente miden o controlan directamente el torque experimentado por uno de los dos cuerpos que está directamente relacionado con el esfuerzo de cizalla y/o la velocidad de rotación, relacionada con la velocidad de cizalla (Gupta, 2000).

Estos instrumentos son los más versátiles para medir funciones materiales de alimentos, debido a que en la mayor parte de sus sistemas de medición son capaces de medir propiedades como la viscosidad ( $\eta$ ), propiedades viscoelásticas como son las diferencias primaria y secundaria de esfuerzos normales ( $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ ,  $\sigma_{22} - \sigma_{33}$ ), la viscosidad dinámica ( $\eta'$ ) y el módulo de almacenamiento, ( $G'$ ), entre otros. Otra de sus ventajas es que en la mayoría de los casos, las funciones materiales pueden obtenerse directamente de las cantidades experimentales medibles, sin la necesidad de realizar correcciones. La única limitación de estos dispositivos radica en que no pueden trabajar a valores altos de velocidad de cizalla, el flujo se vuelve inestable por la aparición de flujos secundarios provocados, en gran parte, por los efectos inerciales (García-Rejón, 1981). Los instrumentos comerciales de este tipo, que pueden aplicarse a alimentos se encuentran listados en el anexo A, mientras que la comparación entre reómetros de control de esfuerzo y control de velocidad y sus características de operación en el Anexo B.

#### A) Cilindros concéntricos

Un viscosímetro de cilindros concéntricos consta de dos cilindros (Figura 4.4) con un estrecho espacio anular entre ellos (uno de los cilindros el interno o el externo está unido a un motor de velocidad variable. El fluido cuya viscosidad se desea medir se coloca en el espacio anular, en un volumen de 5 a 50 cm<sup>3</sup> (Schramm, 1994). Opera en un intervalo de velocidades de cizallamiento moderado, generalmente se utiliza para medir materiales de viscosidad baja y

media. Para este tipo de geometría se puede tener dos sistemas de medida, el Searle, donde el cilindro interno gira y el cilindro externo permanece fijo durante la determinación y el sistema Couette, donde el cilindro externo gira y el cilindro interno está fijo. En esta geometría se debe tomar en cuenta que el movimiento del fluido se apegue a las siguientes consideraciones para poder aplicar las relaciones matemáticas propuestas: flujo laminar y estado estacionario; fluidos incompresibles; las propiedades no son función de la presión, no hay deslizamiento en la pared del cilindro que gira y temperatura constante (Steffe, 1996).

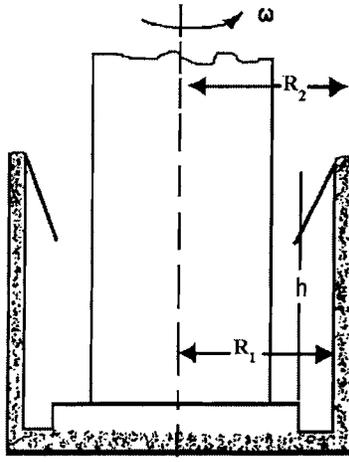


Figura 4.4 Geometría de cilindros concéntricos (www.her.itesm.mx).

Cuando se selecciona un viscosímetro de cilindros concéntricos para un líquido particular uno

debe tener cuidado en seleccionar un sistema con una relación de radios pequeña  $\delta = \frac{R_2}{R_1}$

teniendo en mente que de no ser así se pueden presentar problemas con partículas  $\frac{1}{3}$  más

pequeñas que el espacio anular. En cilindros concéntricos la ecuación importante para fluidos newtonianos es:

$$\sigma(r) = \frac{M}{2\pi r^2 h}; \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad (4.7)$$

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{2\omega R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \quad (4.8)$$

Un torque  $M$  es producido por la velocidad de rotación angular  $\omega$  en radianes por segundo. Como puede verse en la Figura 4.4 el radio del cilindro interno y el cilindro externo son  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente. La longitud inmersa del cilindro es  $h$ , y  $r$  es algún radio arbitrario entre  $R_1$  y  $R_2$ .

Note que en la ecuación 4.7 la relación entre el esfuerzo de cizalla y el torque, es independiente de la naturaleza constitutiva del fluido. Si el espacio anular es pequeño comparado con el diámetro de los cilindros, la velocidad de cizalla es linealmente constante a través del espacio anular para todos los fluidos; esta velocidad de cizalla es dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega R_1}{R_2 - R_1} \quad (4.9)$$

La principal corrección que se debe aplicar a la información para obtener la viscosidad real es una corrección final para viscosímetros de cilindros concéntricos. El líquido en el fondo del cilindro interno crea un arrastre adicional y provoca una elevación en el torque en adición al torque debido al líquido en el espacio anular. De esta manera la medición del torque es equivalente al cilindro interno con una longitud aparente mayor que la longitud real. La manera de tomar en cuenta esta longitud adicional es calibrando el viscosímetro con un líquido de viscosidad conocida y utilizar la siguiente ecuación (Gupta, 2000):

$$\eta = \frac{kM}{\omega} \quad (4.10)$$

La forma de la ecuación 4.10 sigue desde la viscosidad real en el radio del esfuerzo de cizalla a la velocidad de cizalla, y estas dos cantidades son dadas respectivamente por el lado derecho de las ecuaciones 4.7 y 4.9. La constante del instrumento  $k$  toma en cuenta una corrección cuyo valor depende del volumen del líquido en el viscosímetro, el cual se mantiene constante. La corrección final es insignificante si la longitud inmersa es una pareja del orden de la magnitud más largo que el espacio anular. La corrección puede también verse

minimizada por la forma del fondo del cilindro interno al parecerse a un cono invertido (Gupta, 2000).

### B) Cono y placa

El viscosímetro de cono y placa (Figura 4.5) actúa sobre un principio similar al de cilindros rotatorios concéntricos. El cono rota a una velocidad determinada y el fluido se encuentra en el espacio entre el cono y la placa y transmite un par de torsión (torque) a la placa, par que es medido. El sistema de medición de cono y placa consiste de una placa fija y de un cono rotativo formando un ángulo muy pequeño, los ángulos del cono comerciales normalmente son muy pequeños ( $\alpha = 0.0174$  rad). Los ángulos más aceptables se deben aproximar a la ecuación  $\tan \alpha \approx \alpha$ . En este tipo de sistema de medición se debe considerar el gran número de errores en la información de la medición si no se lleva a cabo un contacto entre el cono y la placa adecuada y si no hay un razonable control de temperatura cuando la muestra es sometida a altas velocidades de cizalla (Schramm, 1994).

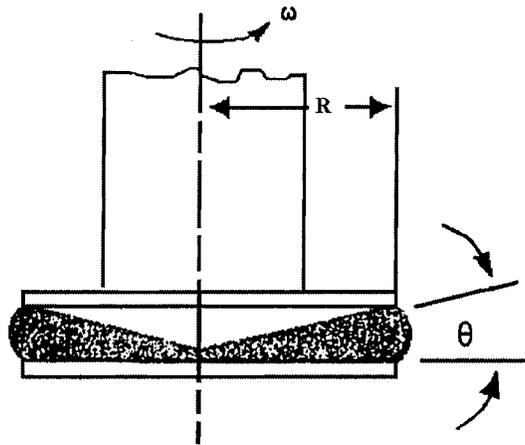


Figura 4.5 Sensor de cono y placa ([www.geocities.com/j0000la/osorio.pdf](http://www.geocities.com/j0000la/osorio.pdf)).

Para ambos tipos de líquidos newtonianos y no newtonianos, las ecuaciones básicas para el reómetro de cono y placa son (Gupta, 2000):

$$\sigma = \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (4.11)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\theta} \quad (4.12)$$

$$N_1 = \frac{2M}{\pi R^2} \quad (4.13)$$

Donde:

$R$  es el radio del cono,  $\theta$  es el ángulo entre el cono y la placa,  $M$  es la medida del torque,  $F$  es la fuerza requerida para mantener la punta del cono en contacto con la placa circular y  $N$  es la fuerza descendente necesaria para dejar la cima del cono truncado en el centro de la placa.

Como  $\theta$  es muy pequeño ( $\sim 0.5^\circ - 3^\circ$ , o  $0.00837 - 0.0532$  radianes),  $\sin^2(\pi/2 - \theta)$  es tomado como 1, y  $\sigma$  puede ser casi independiente de la posición, ecuación 4.13, de esta manera el material colocado en el espacio anular muestra una experiencia de esfuerzo. Esta es la ventaja del sistema de medición de cono y placa, comparada con los otros sistemas (cilindros concéntricos y placas paralelas). Por ejemplo, para el ángulo de  $1^\circ$ , el porcentaje de diferencia esfuerzo entre el cono y la placa es 0.1218%. Está dentro de la medida de precisión más usada. Por lo tanto, uno puede asumir que el esfuerzo y también, la velocidad de cizalla y la viscosidad están uniformemente distribuidos en el fluido.

En la práctica, el cono es frecuentemente truncado por una pequeña cantidad que evita el contacto de la punta del cono (fuerza que será utilizada) y la placa (fuerza que será proyectada), este sistema de medición facilita las pruebas de suspensiones (Schramm, 1994).

Un sistema de medición de cono y placa se utiliza por lo regular para medir la viscosidad de una sustancia que es difícil de limpiar al final de la prueba. Para muchas pruebas de control de calidad de un gran número de dispersiones alimenticias, la limpieza del sensor de cilindros coaxiales es mucho más problemática y se requiere de mayor tiempo para realizarla que el que se requiere para el sistema de medición de cono y placa.

Un motivo importante para escoger el sensor de cono y placa es frecuentemente que el tamaño de la muestra requerida es mucho más pequeña que la que se utilizaría en una prueba de cilindros concéntricos. Es importante considerar esto en los casos en los cuales la muestra sea costosa o tengamos muy poco producto para realizarle las pruebas. En el Cuadro 4.1 se indican algunos volúmenes comunes requeridos en los sistemas de medición de cono y placa; Todo depende del ángulo y del radio del cono seleccionado. Por lo general son ángulos de: 0.5°, 1.0° y 4.0°; radios de: 10, 17.5 y 30 mm (Schramm, 1994).

Cuadro 4.1 Volúmenes requeridos en el sensor de cono y placa (Schramm, 1994).

SISTEMA DE SENSOR	C 20/1	C 35/1	C 60/1	C 60/4
Diámetro (mm)	10	17.5	30	30
Ángulo del cono (°)	1	1	1	4
Volumen (cm <sup>3</sup> )	0.02	0.2	1	4

### C) Placas paralelas

El sistema de placas paralelas (Figura 4.6) requiere de un volumen de muestra mayor que el que se requiere en el sensor de cono y placa de igual radio que el cono, pero este volumen es únicamente una pequeña fracción de lo que se requiere en un sistema de medición de cilindros concéntricos. El sistema de placas paralelas puede ser de mucha utilidad para muestras que contienen grandes agregados, también puede utilizarse este sistema de medición cuando la prueba requiera ser realizada a bajas velocidades de cizallamiento. Este sistema facilita la colocación de la muestra en el espacio anular para las muestras que tienen grandes valores de cedencia ya que no se requiere de un significativo esfuerzo radial del fluido para alcanzar el tamaño final del espacio anular entre la placa anterior a la prueba actual.

El sistema de medición de placas paralelas se usa para determinar la dependencia de la viscosidad de la velocidad de cizalla de líquidos y semisólidos además de ser muy común para pruebas de una gran cantidad de muestras al caracterizar sus propiedades viscoelásticas. Mientras que el sistema de cono y placa con un ángulo pequeño es muy conveniente para la medición de la viscosidad de líquidos no newtonianos, el sistema de placas paralelas con una anchura de 2 mm es ideal para la medición de la elasticidad de alimentos semi-sólidos y visco-elásticos (Schramm, 1994).

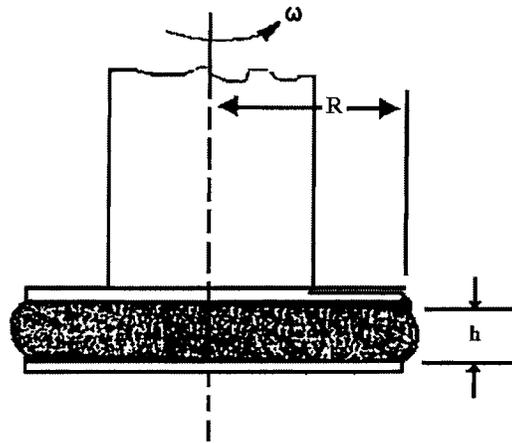


Figura 4.6 Geometría de placas paralelas ([www.geocities.com/joooola/osorio.pdf](http://www.geocities.com/joooola/osorio.pdf)).

Las ecuaciones de placas paralelas, están determinadas por el radio de la placa  $R$  y la distancia  $h$  entre las placas.

En un fluido en cizalla estacionaria, la velocidad de cizalla y el esfuerzo de cizalla en el borde del disco localizado a  $r = R$  son dados por (Gupta, 2000):

$$\dot{\gamma}(R) = \frac{\omega R}{h} \quad (4.14)$$

$$\sigma(R) = \frac{3M}{2\pi R^3} \left[ 1 + \frac{1d \ln M}{3d \ln \dot{\gamma}(R)} \right] \quad (4.15)$$

## FUENTES DE ERROR EN SISTEMAS ROTACIONALES

En un *sistema de medición de cono y placa*, el tamaño del espacio entre el cono y la placa varía desde el nacimiento de la punta del cono a cero, hasta un máximo en el radio del cono  $R_c$  (Figura 4.7). Las dispersiones con partículas pequeñas son sin embargo demasiado grandes en el espacio en el área de la punta del cono. Cuando el cono y la placa son usados para dispersiones con bastantes partículas como dispersiones de almidón o emulsiones con gran número de agregados, estas partículas deberían ser apretujadas desde la punta del cono hacia el exterior de manera que se permitiera tener contacto con el cono. Este fluido radial en la fase de llenado del espacio anular, requiere totalmente de algunas fuerzas axiales, especialmente en el caso de muestras que tienen un gran valor de cedencia al flujo.

- $R_C$  = Radio fuera del cono  
 $\theta$  = ángulo del cono  
 $R_T$  = Radio truncado  
 $a$  = Altura de punta removida

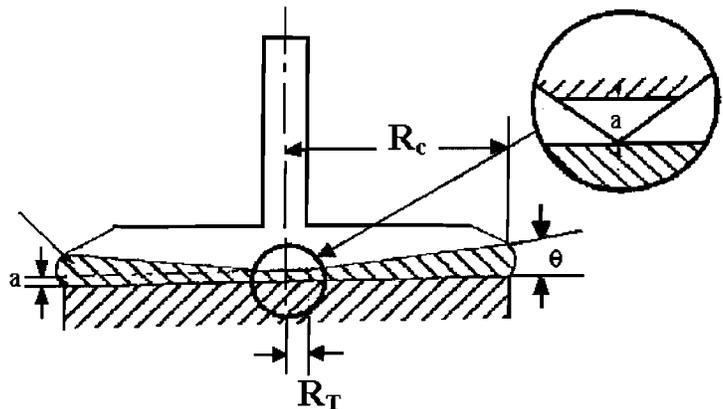


Figura 4.7 Geometría de cono y placa con cono truncado (Schramm, 1994).

En dispersiones tixotrópicas tanto cremas como mayonesas, natillas, entre otros, el cizallamiento radial del flujo puede significar un pre-cizallamiento y una destrucción parcial de la estructura tixotrópica.

Durante una prueba donde se somete a cizallamiento a un fluido, se podría crear un fluido secundario de partículas en dirección radial y se sobrepondría al fluido principal circular afectando de manera negativa al fluido laminar predominante. Un llenado excesivo del espacio anular también provoca que las muestras sean menos homogéneas durante una prueba. Partículas de gran tamaño requieren el uso de conos con ángulos más grandes que un estándar mayor a 0.0532 radianes ( $1^\circ$  a  $4^\circ$ ) el cual incrementará negativamente el efecto del fluido secundario resultante (Schramm, 1994).

El sistema de medición de cono y placa se ve más afectado que el sistema de cilindros concéntricos cuando actúan fuerzas normales las cuales son el resultado de respuestas elásticas de muestras viscoelásticas cuando son sujetas a cizallamiento. Estas fuerzas normales provocan que elementos de la muestra sometida a prueba salgan del espacio anular, la muestra sube hasta el borde del cono.

Cuando la muestra es parcialmente expulsada fuera del espacio anular, se provoca una división parcial de la muestra en medio del espacio anular, lo cual es una distorsión seria para la medición de la viscosidad. En especial el sistema de medición de cono y placa, el efecto de las fuerzas normales generadas, limita su uso a bajas velocidades de cizalla.

Efectos finales en *cilindros concéntricos*: el torque medido por el instrumento debe ser causado solo por la resistencia creada por la muestra cizallada en el espacio anular, las superficies superior e inferior del sistema de medición proporcionan un torque adicional debido a que la muestra es cizallada entre ambas superficies superior e inferior del rotor (cilindro interno en sistema Searle) y el recipiente (cilindro externo) que debe ser minimizado o corregido. Para minimizarlo se recurre a:

1.- Espacio anular muy pequeño  $\delta \cong 1.01$ , alta cizalla:  $\delta = 1.003$

Si el tamaño del espacio anular es muy pequeño y la distancia del rotor y el fondo del cilindro es aproximadamente 100 veces más grande el efecto final es insignificante (Schramm, 1994).

2.- Doble espacio anular

Si el rotor tiene forma de campana. La muestra tiene contacto con el rotor tanto interna como externamente. Ambas caras son delgados anillos que no causan efectos finales, ver figura 4.8. En este sistema el volumen muerto de muestra que se requiere entre la punta del cilindro y la base del recipiente es muy pequeña y es especialmente útil cuando la disponibilidad de la muestra es baja o de muy baja viscosidad (Schramm, 1994).

3.- Diseños especiales de los rotores o cilindro internos

**Sistema alemán DIN 53018.** En estos sistemas, las partes superior e inferior del cilindro presentan una depresión en la que queda atrapado aire, lo cual impide que en los extremos quede muestra que sea cizallada.

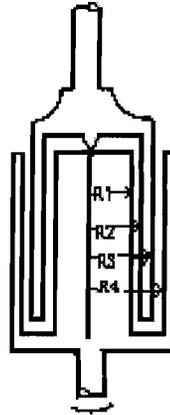


Figura 4.8 Doble espacio anular (Schramm, 1994).

**Sistema ISO 3219 y DIN 53019.** Este sistema consiste en un cilindro interno con una punta cónica y estandarizada. Las relaciones geométricas de los cilindros como la relación de radios, la longitud del rotor contra el radio del mismo y la distancia entre la punta del rotor y el fondo del recipiente, trae como consecuencia que la variación no lineal de la velocidad de cizalla a través del espacio anular y los efectos finales se mantengan constantes para los cilindros pequeños y grandes. Este sistema es el resultado de un compromiso razonable entre los requerimientos reológicos y la aplicabilidad de un amplio espectro de muestras fluidas y disminuir las diferencias entre los resultados con medir una muestra en varios tipos de viscosímetros rotacionales manufacturados en diferentes partes del mundo. La relación de radios manejada por este sistema es  $\delta = 1.0847$ , lo cual es muy cercano al límite superior de 1.1 (Schramm, 1994).

Las ecuaciones de *placas paralelas*, están determinadas por el radio de la placa  $R$  y la distancia  $h$  entre las placas. Esta distancia puede variar, pero no debe ser menor que 0.3 mm y no mayor que 3 mm, otro aspecto que no se debe olvidar para evitar errores en las caracterizaciones en este sistema de medición, es la naturaleza de la muestra. Sistemas de

sensor de placas paralelas se prefieren en lugar de cono y placa si la muestra que se desea caracterizar reológicamente contiene gran número de partículas.

La velocidad de cizalla en este sistema depende específicamente del radio  $r$  de la placa:  $0 < r < R$ . La velocidad de cizalla en este sensor es calculada por el radio externo  $R$  (Schramm, 1994).

#### D) Sistemas de medición no convencionales

En la actualidad se ha incrementado el uso de sistemas de medición complejos, no convencionales en reómetros rotacionales, sus aplicaciones, resumidas en el Anexo C, incluyen la caracterización reológica de fluidos complejos, el análisis de escalamiento y la simulación de unidades de proceso de mezclado, entre otros. Los sistemas de medición no convencionales son aquéllos que no son comúnmente empleados en viscosímetros y reómetros tradicionales, tales sistemas incluyen las que están basadas en impulsores de mezclado (hélice, ancla y paleta) y algunas específicamente diseñadas (aspa) (Cullen y col., 2003). Algunas de ellas se ilustran en la Figura 4.9. Particularmente en el LEM I existen los sistemas de medición de hélice y la de aspa, pero no son comúnmente empleadas. Por lo que sólo se mencionan a grandes rasgos.

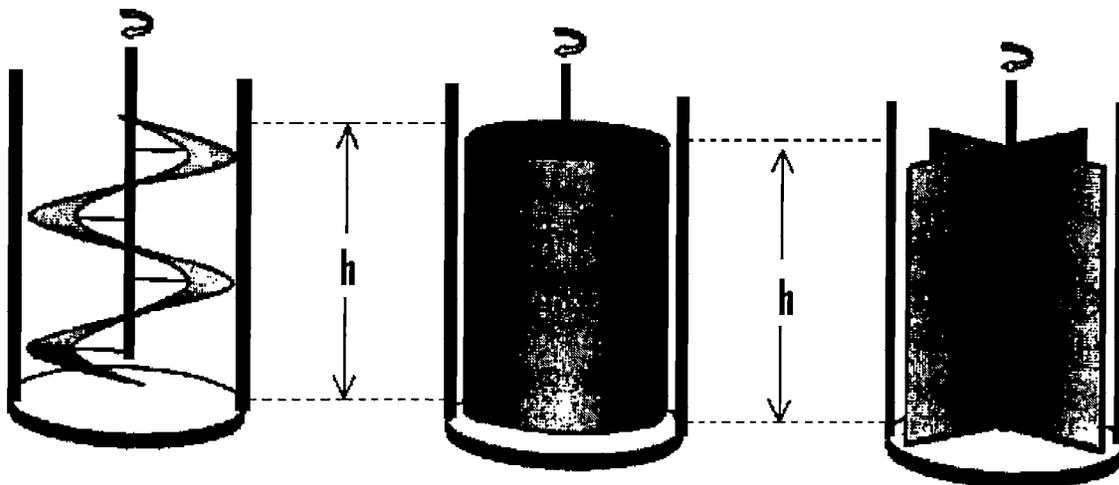


Figura 4.9 Helicoidal, cilindro y geometría de paletas con dimensiones geométricas similares (Cullen y col., 2003).

Numerosos procesos involucran mezclas de fluidos los cuales no pueden ser evaluados usando técnicas de reómetros convencionales. Por lo que es necesario desarrollar técnicas reológicas de caracterización, las cuales simulen condiciones del proceso del fluido en estudio y faciliten los tiempos reales de análisis. Los sistemas de medición tradicionales solo pueden ser utilizados en muestras que ya están completamente mezcladas e incorporadas (productos terminados), sin embargo estos métodos no proveen información de las propiedades reológicas durante las etapas del proceso por lo que se generan retrasos en proceso de análisis. Los sistemas de medición que simulan técnicas de proceso o reactores han sido utilizados con éxito para evaluar un gran número de procesos complejos incluyendo análisis de mezclados, predicciones de consumo de energía y localización de la etapa del proceso.

Los sistemas de medición convencionales como los cilindros concéntricos, placas paralelas y cono y placa exhiben velocidades bien definidas de cizalla, son ideales para caracterizaciones reológicas. Sin embargo, su uso es limitado debido a la naturaleza de los fluidos en estudio. Sistemas de medición irregulares son comúnmente usados para el estudio de fluidos que presentan caracterizaciones complejas, incluyendo grandes partículas, problemas de deslizamiento y dependencia del tiempo. Sistemas de medición los cuales facilitan el mezclado, tanto helicoidales, anclas y canaletas (Figura 4.9), pueden eliminar problemas o errores provocados por el deslizamiento. El uso de mezcladores o principios de mezclado es otra alternativa para evaluar las propiedades reológicas de suspensiones gruesas. En éstos, la idea principal es aplicar los principios básicos usados en la derivación de curvas de potencia de mezclado para estimar la viscosidad aparente (Martínez-Padilla, 2005). El sistema de medición de espas es popular para la determinación del esfuerzo de cedencia y se compara favorablemente con sistemas convencionales (Yoo y col, 1995).

## CONCLUSIÓN

A través de una recopilación bibliográfica se observó que existe mucha información sobre reología. Sin embargo, es difícil encontrar un texto que cubra la información básica necesaria, a un nivel adecuado para los estudiantes que se inician en el estudio de reología a nivel experimental, debido a que existen textos con información básica, pero aún insuficiente para la interpretación de resultados experimentales; así como también existen textos bastante completos, pero con un nivel de especialización más elevado. Por lo que, tratando de obtener la información fundamental, se realizó una síntesis de información sobre reología y se estructuró de tal forma que pueda ayudar a entender los términos empleados en la asignatura de Laboratorio Experimental Multidisciplinario 1, sobre el comportamiento reológico de materiales alimenticios y cómo se relaciona dicho comportamiento reológico con la estructura de los productos alimenticios. Asimismo, también ayudar a conocer los tipos de materiales, su clasificación las técnicas y equipos que pueden utilizar para la caracterización reológica de dichos materiales.

**BIBLIOGRAFIA**

Aguilera, J.M. y Durán-Hidalgo, L. 1996. Glosario de términos reológicos para alimentos en español y en portugués. RIPFADI, Valencia.

Barnes, H.A., Hutton, J.F. y Walters, K. 1989. *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

Bourne, M.C. 1982. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. Academic Press, Geneva, New York.

Carbonell, E., Costell, E. y Durán, L. 1990. Comportamiento reológico de los productos derivados de fruta. Flujo, dependencia del tiempo y plasticidad. Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimento (CSIC). 189-207.

Cullen, P. J., O'Donnell, C.P., Houska, M. 2003. Rotational rheometry using complex geometries, *Journal of Texture Studies*, 34, 1-20.

Daintith, John. 2000. *Dictionary of Chemistry*. 4ta. Edición, New York.

Dealy, J.M. 1995. Official nomenclature for material functions describing the response of viscoelastic fluid to various shearing and extensional deformations. *Journal of Rheology*. 39(1), 253-265.

Ferry, J.D. 1980. *Viscoelastic Properties of Polymers* 3a. ed. John Wiley & Sons, USA

García-Rejón, A. 1981. Introducción a la reología de los polímeros. *Plastinoticias*, septiembre, 37-54.

Goodwin, J.W y Hughes, R.W. 2000. *Rheology for Chemists an Introduction*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, Uk.

Gupta, R.K. 2000. *Polymer and Composite Rheology*. Second edition. Marcel Dekker, Inc. New York.

Ibarz, A. y Col. 2005 *Newtonian and Non-Newtonian Flow in Food Engineering*, *Encyclopaedia of Life Support Systems*. Edited by G.V. Barbosa-Cánovas. Edit. Unesco, France.

Lapasin, R. y Prici, S. 1995. *Rheology of Industrial Polysaccharides: Theory and Applications*. Blackie Academic and Professional, Cornwall, Great Britain

Ma., L. y G.V. Barbosa-Cánovas. 1995. Instrumentación para la caracterización reológica de alimentos. *Food Science and Technology International* 1, 3-17.

Martínez-Padilla, L.P. 2005. Food Suspensions. En *Food Engineering* (Barbosa-Cánovas, ed). UNESCO Publishing, Pp. 323-338. Paris, France.

Mezger, T. 1990. *A Little Course in Rheology Part 2. Oscillation Rheometry* Paar Physica USA. Inc.

Morrison, I. D. y Ross, S. 2002. *Colloidal Dispersions: suspensions, Emulsions and Foams*. Edit Wiley-Interscience, New York, USA.

Muller, H.G. 1973. *Introducción a la Reología de los Alimentos*. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza (España).

Nussinovitch, A., G. Kaletunc., M.D. Normand and Peleg. 1990 Characterization of gellan gels by uniaxial compression, stress relaxation and creep. *Journal of Texture Studies*, 21, 37-49.

Nussinovitch, A., G. Kaletunc., M.D. Normand and Peleg. 1990 Recoverable work versus asymptotic relaxation modulus in agar, carrageenan and gellan gels. *Journal of Texture Studies*, 21, 427-438.

Pine, S.T. 1988. *Química Orgánica*. 4ª. Ed. McGraw-Hill, México.

Rao, M.A. 1999. *Rheology of Fluid and Semisolid Foods. Principles and Applications*. Aspen Publishers, Inc., Gaithersburg, Maryland.

Rao, M.A. y Steffe, J.F. 1992. *Viscoelastic Properties of Foods*. Elsevier Applied Science, England.

Rao, M. A. y Steffe, J.F. 1996. Yield stress of food dispersions with the vane method at controlled shear rate and shear stress. *Journal of Texture Studies*, 26, 1-10.

Rao, M.A. y Steffe, J.F. 1997. Measuring yield stress of fluid foods. *Food Technology*, 51(2), 50-52.

Rosenthal, A. J. 2001 *Textura de los Alimentos*. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza (España).

Schramm, G. 1994. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. Haake, Alemania.

Steffe, J.F. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering 2a*. Ed. Freeman Press, USA.

Streeter, L. V.. 1988. *Mecánica de los Fluidos*. 3era. Ed. McGraw-Hill, México.

Tanner, R.I. 1988. *Engineering Rheology*. Clarendon Press, Oxford. USA.

Tecante, A. 2005. Viscoelasticity. En *Food Engineering* (G. V. Barbosa-Cánovas ed). UNESCO Publishing, Pp. 285-303. Paris, France.

Toledo, R. T. 1991 *Fundamentals of Food Process Engineering*, 2da. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York.

Van Vliet T. 2001. Clasificación reológica de los alimentos y técnicas instrumentales para su estudio. En *Textura de los Alimentos. Medida y Percepción*. (Rosenthal, A.J.), Ed. Acribia, España.

Windhab, E.J. 1995. *Rheology in Food Processing*. En *Physico-Chemical Aspects of Food Processing*. (Beckett, S.T., ed.) pp. 80-116. Glasgow, Great Britain.

Yoo, B., Rao, M.A., Steffe, J.F. 1995. Yield stress of food dispersions with the vane method at controlled shear rate and shear stress. *Journal of Texture Studies* 26, pp 1-10.

#### DIRECCIONES ELÉCTRONICAS CONSULTADAS.

1. Viscosímetros.

[www.her.itesm.mx](http://www.her.itesm.mx)

2. Determinación de propiedades reológicas de alimentos fluidos

[www.geocities.com/jooolala/osorio.pdf](http://www.geocities.com/jooolala/osorio.pdf)

3. El misterioso flujo de los líquidos poliméricos

<http://omega.ilce.edu.mx>

4. Dispositivos rotacionales

<http://www.hemerodigital.unam.mx>

**ANEXO A****TIPOS DE REÓMETROS COMERCIALIZADOS (Morrison, 2002).**

<b>FABRICANTE</b>	<b>CARACTERISTICAS DE LOS REÓMETROS</b>
<p>ATS Rheosystems 52 Georgetown Rd Bordentown, NJ 08505</p>	<p>Control de tensión y control de la deformación.</p>
<p>Products, Inc. 3030 Max Roy St. Houston, TX 77008</p>	<p>Reómetro de vara vibratoria en línea</p>
<p>Bohlin Instruments Inc. 1004 eastpark Blvd.. Cranbury, NJ 08512</p>	<p>Tension y deformación controlada</p>
<p>Instruments, Inc. One Cantiague Rd. P.O. Box 1019 Wesbury, NY 11590-0207</p>	<p>Viscosímetros Capilares</p>
<p>Brookfield Engineering Laboratories 11 Commerce Blvd. Middleboro, MA 02346</p>	<p>Rotacional y control de estrés</p>
<p>Camtel, Ltd. 5 Carrington House 37 Upper King St. Royston, Herts SG8 9AZ, UK</p>	<p>Reometro interfacial Wilhelmy plate and ring Bartell technique</p>

Cambridge Applied Systems, Inc. 196 Boston Ave. Medford, MA 02155	Reómetro de pistón en línea.
Chemical Electrophysics Corp. 705 Yorklyn Rd. Hockessin, DE 19707	Squeezing flow
DICKEY-john Corp. 5200 DICKEY-john rd Auburns, IL 62615	Sensor de microbalance de cuarzo
Nametre 25 Wiggins Ave. Bedford, MA 01730	Reómetros vibratorios
Paar Physica USA, Inc. 1056 Technology Park Dr. Glen Allen, VA 23060	

## ANEXO B

**VENTAJAS DEL USO DE REÓMETROS CONTROL DE ESFUERZO**

Los reómetros de control de esfuerzo presentan varias ventajas sobre los de control de velocidad. Entre las más importantes tenemos (Schramm, 1994):

- Mayor sensibilidad para diferenciar muestras a bajas velocidades de cizallamiento.
- Mayor sensibilidad para diferenciar fluidos altamente newtonianos.
- Diferencian la zona de viscosidad constante a bajas velocidades de cizallamiento que presentan algunos fluidos newtonianos.
- Mucho mejores para determinar el esfuerzo inicial. Los instrumentos que controlan velocidad dan mayor error.
- Permiten evaluar propiedades viscoelásticas en pruebas Creep o fluencia (medición de deformación en función del tiempo a esfuerzo constante).

**Forma de operar de los instrumentos rotacionales:**

Los instrumentos rotacionales operan dos tipos de pruebas: pruebas estáticas y pruebas dinámicas (Schramm, 1994).

**Estáticas:** El esfuerzo o la deformación impuesta para producir una respuesta son constantes. Dentro de las pruebas estáticas se pueden obtener los siguientes resultados:

- Curva de flujo (CR, CS).
- Curvas de viscosidad (CR, CS).
- Curvas de esfuerzo o viscosidad en función del tiempo (CR, CS).
- Curvas de fluencia: Deformación en función del tiempo a esfuerzo constante (CS). (Para evaluar comportamiento viscoelástico).

- **Curvas de relajación:** Esfuerzo en función del tiempo a deformación constante (CR). (Para evaluar comportamiento viscoelástico).

**Dinámicas:** El esfuerzo o la deformación impuestos para producir una respuesta varían de manera sinusoidal. Dentro de las pruebas dinámicas se obtienen los siguientes resultados:

- Barrido de esfuerzos o de deformación a frecuencia constante.
- Barrido de frecuencia a deformación o esfuerzo constante (espectro mecánico). Ambos evalúan el comportamiento viscoelástico.

#### Sistema en que operan los instrumentos rotacionales.

**Sistema:** Se refiere a cual de los dos cuerpos gira, se tienen dos opciones:

**Sistema Searle:** Gira el cilindro interno, o el cono (en cono-plato) o el plato superior (plato-plato).

En un reómetro de control de esfuerzo, al cuerpo giratorio se le impone un torque que ocasiona que el rotor gire a una velocidad ( $N$ ) y ocasione una velocidad de cizallamiento que se correlaciona inversamente con la viscosidad de la muestra. Se tiene un sistema de medición con un sensor de  $N$  (rpm),  $\phi$  (desplazamiento angular),  $\theta$  (velocidad angular) y  $\omega$  (frecuencia). En esta prueba, el torque impuesto y la velocidad de rotación resultante actúan en el mismo eje. El torque y la velocidad de rotación pueden ser convertidos directamente en el esfuerzo y la velocidad de cizallamiento respectivamente. En este tipo de prueba se puede colocar un sensor de fuerza normal en la placa o plato inferiores.

En un instrumento de control de cizalla o velocidad, al rotor (interno o superior) se le impone una velocidad de rotación mientras el externo está en reposo. El movimiento del cilindro interno fuerza al fluido a fluir en el espacio. La resistencia que opone el fluido a ser cizallado resulta en una viscosidad relacionada con el torque que se produce en el cuerpo rotatorio, el cual es medido por un resorte colocado entre el motor y la varilla del rotor.

El sistema Searle da problemas de turbulencia en fluidos de baja viscosidad a altas velocidades de cizallamiento (Schramm, 1994).

**Sistema couette:** En este sistema, gira el cilindro externo o la placa o plato inferior, forzando al líquido a fluir en el espacio entre los dos cuerpos. La resistencia del material a ser cizallado transmite un torque relacionado con la viscosidad al cilindro interno (o plato o cono superior) induciéndolos a rotar. Se mide el torque<sup>1</sup> requerido para contrarrestar este efecto y mantener así el cuerpo interno o superior en reposo.

El sistema Couette permite medir sin problema fluidos de baja viscosidad a velocidades de cizallamiento altas. Su principal problema es con el control de la temperatura. En este tipo de prueba se puede medir el esfuerzo normal que tiende a separar el cono o plato superior del inferior, colocando un sensor de esfuerzo normal en la parte superior. El tratamiento matemático del problema físico de un fluido que es deformado por efecto de esfuerzos de cizalla origina ecuaciones diferenciales muy complejas que sólo pueden dar una solución matemática aceptable cuando las condiciones de prueba se mantienen dentro de ciertas restricciones (condiciones límite). La ley de Newton de la reometría es válida solamente en el marco de estas restricciones que son (Sharmm, 1994):

- Flujo laminar.
- Flujo en estado estacionario. El esfuerzo de cizalla aplicado está directamente correlacionado a la velocidad de cizallamiento. La energía adicional requerida para acelerar y desacelerar el flujo no debe ser considerada.
- No existe deslizamiento en las paredes en contacto con el material bajo cizalla. El esfuerzo de cizalla debe ser transmitido a través de la capa límite a todo el fluido. El deslizamiento se presenta en sistemas bifásicos (emulsiones, suspensiones, geles, entre otros).

---

<sup>1</sup> El torque: es la fuerza aplicada en una palanca que hace rotar alguna cosa. Al aplicar fuerza en el extremo de una llave se aplica un torque que hace girar las tuercas. En términos científicos el torque es la fuerza aplicada por el largo de la palanca ( $\text{Torque} = F \times D$ ), y se mide comúnmente en Newtons por metro.

- La muestra debe ser homogénea. Debe reaccionar al cizallamiento de manera uniforme. Cada elemento de volumen debe tener la misma composición y no debe haber separación de fases por efecto de cizallamiento.
- El material debe ser isotrópico. Las propiedades mecánicas son las mismas para todas las direcciones de aplicación de una fuerza
- Se debe tener flujo viscométrico (cizalla simple). El volumen de cada elemento de fluido es constante, las líneas de corte consisten del mismo conjunto de partículas en cada instante, la velocidad de cizalla es independiente del tiempo y de la posición, las superficies de corte son planos.
- No deben ocurrir cambios físicos ni químicos durante la prueba.
- No debe haber elasticidad. Toda la energía aplicada debe disiparse al fluir. Las muestras con propiedades viscoelásticas almacenan temporalmente parte de la energía aplicada y solo parte de ésta induce flujo. En los sistemas rotacionales, los materiales viscoelásticos desarrollan esfuerzos normales que ocasionan que el fluido trepe por la varilla del rotor.

Como puede observarse, algunas de estas condiciones límite dependen del sistema de medición y otras del material bajo prueba. Las condiciones que dependen del sistema de medición son cumplidas por los sistemas de medición: cilindros concéntricos, cono-plato, plato-plato.

## ANEXO C

**APLICACIONES REPORTADAS USANDO GEOMETRÍAS COMPLEJAS NO CONVENCIONALES EN REÓMETROS ROTACIONALES** (Cullen y col., 2003).

<b>GEOMETRÍA</b>	<b>PROPIEDAD MEDIDA</b>	<b>PRODUCTO</b>	<b>REFERENCIA</b>
Cinta helicoidal	Análisis de mezcla	Suspensiones y emulsiones	Hugelshofer y col. (2000)
	Evolución de proceso	Emulsiones y helado	Choplin (2000)
	Viscosidad	Suspensiones	Brito-De La Fuente y col. (1998)
	Curvas de flujo	Suspensiones	Martinez-Padilla y col. (1999)
	Curvas de flujo	Suspensiones	Cantu-Lozano y col. (2000)
	Consumo de potencia	Espesamiento por cizalla, Suspensiones	Jomha y col. (1990)
Ancla	Evolución de proceso	Loción, cosméticos	Choplin y col. (1998)
	Tixotropía	Suspensiones	Sestak y col. (1982, 1986)
	Consumo de potencia	Espesamiento por cizalla, Suspensiones	Jomha y col. (1990)
Paletas/banderas	Velocidad de cizalla	Soluciones de CMC	Castell-Perez y Steffe (1990)
	Velocidad de cizalla	Modelos de fluidos	Rao y Cooley (1984)
	Tixotropía	yogur de chabacano	Ford y Steffe (1986)
	Tixotropía, viscosidad, recuperación	Pasta o masa	Hsia y col. (1992)

<b>GEOMETRÍA</b>	<b>PROPIEDAD MEDIDA</b>	<b>PRODUCTO</b>	<b>REFERENCIA</b>
Aspas	Modulo de cizalla	Geles fluidos	Sherwood y Meeten (1991)
	Pruebas de cizalla oscilatoria de pequeña amplitud	Alimentos viscoelásticos	Junus y Briggs (2001)
	Untabilidad	Alimentos untables	Daubert y col. (1988)
	Viscosidad	yogur	Geraghy y Butler (1999)
	Viscosidad / esfuerzo de cedencia	Concentrado de tomate	Yoo y Rao (1995)
	Esfuerzo de cedencia	Suspensiones	Nguyen y Boger (1983)
	Esfuerzo de cedencia	Dispersiones alimenticias	Yoo y col. (1995)
	Esfuerzo de cedencia	Suspensiones	Nguyen y Boger (1985)
	Esfuerzo de cedencia	Emulsiones	Yoshimura y col. (1987)
	Esfuerzo de cedencia	Helados	Briggs y col. (1996)
	Esfuerzo de cedencia	Yogur	Dimonte y col. (1998)
	Esfuerzo de cedencia	Mermelada de fruta	Houska y co. (1997)
	Esfuerzo de cedencia	Quesos procesados	Mleko y Foegeding (2000)
	Esfuerzo de cedencia	Suspensiones alimenticias	Missaires y col. (1990)
	Esfuerzo de cedencia	Espumas	Pernell y col. (2000)
	Esfuerzo de cedencia	Varios alimentos	Rao y Steffe (1997)
	Esfuerzo de cedencia	Geles alimenticios	Truong y Daubert (2000)
	Esfuerzo de cedencia	Chocolate líquido	Wilson y co. (1993)
	Esfuerzo de cedencia	Yogur	Kovalenko y Briggs (2000)