

Fundamentos de Reología de Alimentos

JUAN SEBASTIÁN RAMÍREZ NAVAS

© 2006 JSR e-books
Cali, Valle, Colombia

Diseño de cubierta: Juan Sebastián Ramírez

Reservados todos los derechos

Categoría: Ingeniería de Alimentos

Publicado en Colombia, Suramérica

INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA DE ALIMENTOS

Tabla de Contenidos

1. <u>INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA</u>	5
1.1. PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LOS ALIMENTOS	5
1.2. IMPORTANCIA DE LA REOLOGÍA EN LA INVESTIGACIÓN Y EN EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS.	7
2. <u>REOLOGÍA</u>	9
2.1. DEFINICIÓN	9
2.2. HISTORIA DE LA REOLOGÍA	10
3. <u>LA VISCOSIDAD</u>	16
3.1. DEFINICIÓN	16
3.2. UNIDADES	16
3.3. TIPOS DE VISCOSIDAD	17
3.3.1. La viscosidad dinámica o absoluta,	17
3.3.2. La viscosidad aparente	17
3.3.3. Viscosidad cinemática	18
3.4. VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA VISCOSIDAD	19
3.4.1. Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación	19
3.4.2. Variación de la viscosidad con la temperatura	20
3.4.3. Variación de la viscosidad con la temperatura y la presión:	21
3.4.4. Variación de la viscosidad con la presión.	21

4. CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS	23
4.1. INTRODUCCIÓN	23
4.2. TIPOS DE FLUIDOS:	26
4.2.1. Fluidos newtonianos	1
4.2.2. Fluidos no newtonianos:	3
4.2.3. Fluidos viscoelásticos:	16
5. BIBLIOGRAFÍA	18

1. INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA

1.1. PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LOS ALIMENTOS¹

Los fluidos constituyen la mayor parte de los alimentos que ingiere el hombre; los adultos consumen más productos líquidos y pastosos que alimentos sólidos por la facilidad de ingestión y digestión; en los niños y recién nacidos la importancia de los alimentos fluidos y particularmente líquidos es fundamental.

Cuando un alimento se procesa, el mismo está sujeto a un movimiento constante; en la práctica es muy difícil pensar en un producto que no requiera movilización.

Se atribuye el uso de la palabra Reología al Profesor Crawford, quien la utilizó para definir a la ciencia del flujo. En el momento actual se acepta que la Reología es la ciencia dedicada al estudio de la deformación y el flujo; su desarrollo, en especial durante los últimos años, es notorio. Merece destacarse el trabajo del Profesor Prentice, relacionado con la reología de productos alimentarios y su medida.

Varias son las razones para determinar las propiedades reológicas de alimentos. Son básicas en la ingeniería de procesos para el diseño de plantas, en el cálculo de requerimientos de bombeo; para establecer las dimensiones de tuberías y válvulas; para realizar mezclas; además, se utilizan en el cálculo de operaciones

¹ Alvarado, J. de D. "**Principios de Ingeniería Aplicados a Alimentos**". Ed. Radio Comunicaciones, Quito, Ecuador. 1996. p 180

básicas con transferencia de calor, masa y cantidad de movimiento. También se aprovechan para control instrumental de calidad del material crudo previo al procesamiento, de productos intermedios durante la manufactura, y de los productos finales después de la producción. Sirven para evaluar la calidad preferida por el consumidor por medio de correlaciones entre las medidas reológicas y pruebas sensoriales. Permiten elucidar la estructura o composición de alimentos y analizar los cambios estructurales que ocurren durante un proceso.

Se definen a los fluidos como las sustancias que fluyen sin desintegrarse cuando se aplica una presión, lo cual incluye a gases, líquidos y ciertos sólidos. En especial, para el caso de los líquidos se requieren diferentes esfuerzos de cizalla, para permitir que las moléculas de una capa pasen a otra a cierta velocidad. La relación entre el esfuerzo de cizalla requerido para inducir una determinada velocidad de deformación en cizalla, caracteriza el comportamiento reológico de un fluido.

En los fluidos llamados newtonianos, el esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la velocidad de deformación en cizalla o, abreviadamente, velocidad de cizalla y la constante de proporcionalidad corresponde a la viscosidad. Muchos fluidos alimentarios se desvían de este comportamiento; pertenecen al grupo de los fluidos no-newtonianos, en los cuales el término índice de consistencia es equivalente a una viscosidad no-newtoniana. Pero para definir el flujo se requiere de otros términos: el índice de comportamiento al flujo y, en ciertos casos, el esfuerzo de fluencia (tensión mínima de deformación o umbral de fluencia).

1.2. IMPORTANCIA DE LA REOLOGÍA EN LA INVESTIGACIÓN Y EN EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS.

Existen varios campos en los que se observa la importante participación del conocimiento reológico:

- Cálculos en Ingeniería de procesos en donde se involucren diversos equipos. P. ej.: Bombas, extrusores, mezcladores, homogenizadores, intercambiadores de calor, tuberías, etc.
- Formulación para el desarrollo de productos.
- Control de calidad en productos intermedios y finales: este control se realiza en la propia línea de producción. Es determinante para la aceptación de productos como patatas fritas, cereales, quesos, aperitivos, yogures, dulces, chocolates, cremas, etc.
- Estudio de vida en anaquel.
- Evaluación de la textura del alimento mediante la correlación con datos sensoriales.
- Estudio de la textura y consistencia de productos alimenticios: dichas propiedades son muy importantes a la hora de que un producto sea del agrado del consumidor.
- Producción de pegamentos: el estudio de su plasticidad, de la forma de fluir dentro del recipiente que lo contiene, etc.
- Producción de pinturas: una pintura debe ser esparcida de forma fácil pero sin que escurra.
- Producción de productos cosméticos y de higiene corporal: la duración de una laca sobre el pelo, la distribución de la pasta de dientes por toda la boca, la forma de cómo se esparce una crema, etc. Todas

estas características se estudian con la reología para obtener la mayor eficacia del producto.

- Producción de medicamentos: se estudia su estabilidad química, su tiempo de caducidad y su facilidad de extrusión, entre otras.
- Caracterización de elastómeros y de polímeros tipo PVC.
- Estabilidad de emulsiones y suspensiones.
- Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
- Caracterización de metales (en situaciones de elevada temperatura), y de cristales líquidos.
- Control de sustancias que sean transportadas a lo largo de un recipiente cilíndrico (para evitar la reopexia).
- Estudio del magma en vulcanología: cuanto más fluido sea el magma más tendencia va a tener el volcán a que provoque una erupción.

2. REOLOGÍA

2.1. DEFINICIÓN

La Reología es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes, por ejemplo.

Un concepto formal del término reología sería: "Parte de la mecánica que estudia la elasticidad, plasticidad y viscosidad de la materia"²

La reología³, es decir, «la ciencia del flujo y la deformación», estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas, materiales cristalinos y otros. Por lo tanto, el campo de la reología se extiende, desde la mecánica de fluidos newtonianos por una parte, hasta la elasticidad de Hooke por otra. La región comprendida entre ellas corresponde a la deformación y flujo de todos los tipos de materiales pastosos y suspensiones. El comportamiento reológico, en estado estacionario, de la mayor parte de los fluidos que se indican en la Fig. 2.1-1 puede establecerse mediante una forma generalizada de la Ec. 2.1-1

² Diccionario Enciclopédico Ilustrado OCEANO UNO (1989)

³ BIRD, R. B, STEWART, E. N, LIGHTFOOT, "**Fenómenos De Transporte**". Ed. Reverte, 1998. p 1-10

$$\sigma_{yx} = -\eta \frac{dv_x}{dy}$$

Ec 2.1-1

en la que la viscosidad, η , puede expresarse a su vez en función de dv_x/dy o de σ_{yx} indistintamente.

En las regiones en que η disminuye al aumentar el gradiente de velocidad ($-dv_x/dy$), el comportamiento se denomina pseudoplástico; y dilatante en las que aumenta con dicho gradiente. Si η resulta independiente del gradiente de velocidad, el fluido se comporta como newtoniano, y entonces $\eta = \mu$.

2.2. HISTORIA DE LA REOLOGÍA

En 1678 Robert Hooke fue el primero que habló de la reología en su libro "Verdadera teoría de la Elasticidad". Dicha teoría se resumía en lo siguiente: "Si se dobla la tensión, se dobla deformación".

Nueve años después, Isaac Newton publicó en "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" una hipótesis asociada al estado simple de cizalladura (o corte): "La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él". Esta necesidad de deslizamiento es lo que ahora se denomina "Viscosidad", sinónimo de fricción interna. Dicha viscosidad es una medida de la resistencia a fluir.

La fuerza por unidad de área que se requiere para el movimiento de un fluido se define como F/A y se denota como " σ " (tensión o esfuerzo de cizalla). Según Newton la

tensión de cizalla o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad (dv/dy), o también denominado como $\dot{\gamma}$. Si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Ec 2.2-1

Esta fórmula se denomina Ley de Newton, que es aplicable actualmente aún para unos fluidos determinados (Newtonianos). La glicerina y el agua son ejemplos muy comunes que obedecen la Ley de Newton. Para la glicerina, p. ej., la viscosidad vale 1000 mPa·s, en cambio para el agua la viscosidad vale 1 mPa·s, es decir, es mil veces menos viscosa que la glicerina.

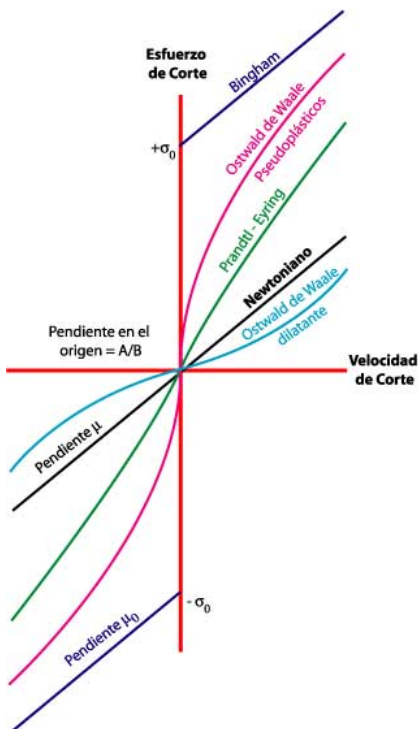


Fig. 2.1-1 El comportamiento reológico, en estado estacionario.

En esta época apareció la Ley de Hooke que fue de aplicación para el estudio de la reología de sustancias sólidas:

$$\sigma = G \cdot \gamma \quad \text{Ec 2.2-2}$$

Siendo:

- σ : esfuerzo cortante (Pa)
- G: módulo de rigidez (Pa).
- γ : deformación (%).

La fórmula nos dice que si se aplica una carga σ sobre un cuerpo sólido, éste va a sufrir una cierta deformación γ . El valor de dicha deformación se mantendrá hasta que cese el esfuerzo aplicado.

Hace 300 años los estudios relacionados con la Reología se reducían a aplicar la Ley de Newton para líquidos y la Ley de Hooke para sólidos. Fue a partir del siglo XIX cuando los científicos comenzaron a tener dudas acerca de la validez universal de estas leyes lineales.

En 1835 W. Weber llevó a cabo una serie de experimentos con gusanos de seda y vio que no eran perfectamente elásticos. Lo que observó fue que una carga longitudinal producía una extensión inmediata, seguida de un posterior alargamiento conforme transcurría el tiempo. Al eliminar la carga se producía una contracción inmediata, seguida de una contracción gradual de la longitud hasta llegar a la inicial. Estas características se asocian a la respuesta de un líquido.

En 1867 J.C. Maxwell, en su artículo “Sobre la teoría dinámica de los gases”, incluido en la Enciclopedia Británica, propuso un modelo matemático para describir los fluidos que poseen propiedades elásticas, es decir, elementos asociados a la respuesta de un sólido:

$$\sigma = \beta \cdot \gamma \quad \text{Ec 2.2-3}$$

donde β es un parámetro semejante al módulo de rigidez (Parámetro no-nulo). Tanto la conducta que observó Weber en sólidos como Maxwell en líquidos se denominó posteriormente “Viscoelasticidad”.

Después de Maxwell no se profundizó más en el estudio hasta la segunda década del siglo XX, apareciendo una serie de modelos lineales (flujo plástico y punto de fluidez) y no lineales de comportamiento.

A partir de la Segunda Guerra Mundial, la Reología cobró mucha fuerza con la búsqueda de materiales viscoelásticos para lanzallamas. Aparecieron poco a poco modelos que asumieron que tanto el módulo de rigidez podían variar con la tensión aplicada. Además se observó que la viscosidad también dependía del tiempo (Tixotropía y Reopexia) y se profundizó en que los materiales reales pueden presentar comportamiento viscoso, elástico, o una combinación de ambos.

En 1945 M. Reiner definió el número de Deborah, D_e como:

$$D_e = \frac{\tau}{T} \quad \text{Ec 2.2-4}$$

En donde " τ " es el tiempo característico del material y " T " el tiempo característico del proceso de deformación. Si D_e era muy alto se consideraba al material como un sólido elástico, y si D_e era muy bajo se le consideraba como un líquido viscoso.

A partir de ese año, el interés por la reología fue aumentando con la aparición de las fibras sintéticas, plásticos, detergentes, aceites multigrado, pinturas y adhesivos entre otros, estudiándose para ello suspensiones newtonianas tanto diluidas como concentradas.

La reología ha sido muy importante y lo seguirá siendo para el desarrollo de múltiples industrias, como por ejemplo la industria farmacéutica y alimentaria, así que es de gran relevancia un estudio minucioso de ésta.

Reología

3. LA VISCOSIDAD

3.1. DEFINICIÓN

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Dicho concepto se introdujo anteriormente en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Ec 3.1-1}$$

donde,

τ : esfuerzo cortante [mPa].

μ : viscosidad [mPa·s]

$\dot{\gamma}$: velocidad de deformación [s^{-1}]

3.2. UNIDADES

Las unidades de viscosidad más utilizadas son los milipascales por segundo [mPa·s]. Se debe tener en cuenta que:

$$1000 \text{ mPa}\cdot\text{s} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Además, el sistema cegesimal aún se sigue usando, siendo la unidad de medida el centiPoise [cp]. La conversión de unidades entre los dos sistemas es:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cp} &= 1 \text{ mPa}\cdot\text{s} \\ 1 \text{ Poise} &= 1 \text{ g/cm}\cdot\text{s} \end{aligned}$$

La tabla siguiente es una aproximación del valor de la viscosidad para sustancias muy conocidas a temperatura y presión ambientales:

Tabla 3.2-1 Viscosidad Aproximada a T y P amb.

Fluidos	Viscosidad aprox (mPa·s)
Vidrio	10^{43}
Vidrio Fundido	10^{15}
Betún	10^{11}
Polímeros fundidos	10^5
Miel líquida	10^4
Glicerol	10^3
Aceite de oliva	10^2
Agua	10^0
Aire	10^{-2}

3.3. TIPOS DE VISCOSIDAD

Existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente.

3.3.1. La viscosidad dinámica o absoluta,

Denominada “ μ ” se ha visto anteriormente en la Ec 3.1-1. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define también como la pendiente en cada punto de dicha curva.

3.3.2. La viscosidad aparente

“ η ” se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de “viscosidad” para fluidos no newtonianos (Fig. 3.3.2-1).

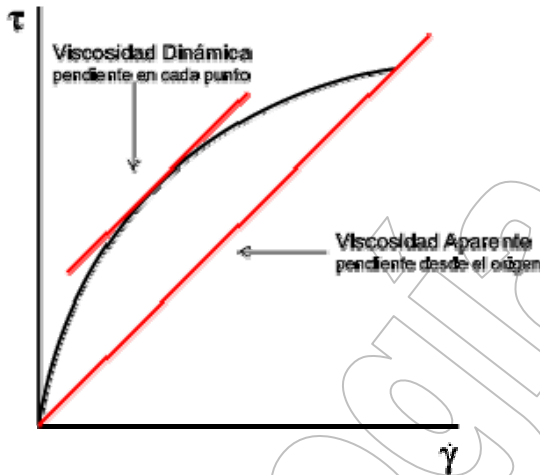


Fig. 3.3.2-1: Curva de fluidéz para representar la viscosidad dinámica y aparente.

3.3.3. Viscosidad cinemática

Por último existe otro término de viscosidad “ ν ” denominado viscosidad cinemática, que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado. Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centistokes [cst].

$$1 \text{ stoke} = 100 \text{ centistokes} = \text{cm}^2/\text{s}$$

Su ecuación es la siguiente:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ec 3.3.3-1}$$

Siendo:

ν : viscosidad cinemática.

μ : viscosidad dinámica .

ρ : densidad del fluido.

3.4. VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA VISCOSIDAD

La viscosidad puede estar muy afectada por variables como el gradiente de velocidad de deformación, la temperatura y la presión entre otros, siendo éstas las más importantes.

3.4.1. Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación

Dicha variación se estudiará más adelante ya que va a ayudar a clasificar los diferentes tipos de fluidos que se pueden encontrar desde el punto de vista reológico. La siguiente tabla muestra el rango de gradientes de velocidad de diversos procesos muy conocidos y sus aplicaciones.

Tabla 3.4.1-1 Rango de gradientes de velocidad.

Tipo de proceso	Rango típico de gradiente de velocidad (s^{-1})	Aplicaciones
Sedimentación de partículas finas sobre un líquido	10^{-6} - 10^{-4}	Medicinas, pinturas
Nivelación debido a tensión superficial	10^{-2} - 10^{-1}	Pinturas, tintas de impresión
Escurredo bajo gravedad	10^{-1} - 10^1	Dar mano de pintura, blanquear lavabos
Extrusión	10^0 - 10^2	Polímeros
Amasado	10^1 - 10^2	Alimentos
Mezclado y agitado	10^1 - 10^3	Líquidos
Flujo en tuberías	10^0 - 10^3	Bombeado
Pulverizado y Pintado	10^3 - 10^4	Secado en spray, pintura
Fricción	10^4 - 10^5	Cremas y lociones para piel
Lubricación	10^3 - 10^7	Motores de gasolina

3.4.2. Variación de la viscosidad con la temperatura

3.4.2.1. Líquidos

La viscosidad disminuye con la temperatura. Existen varias fórmulas que permiten evaluar la variación de la viscosidad de un líquido al cambiar la temperatura. Las más importantes son:

3.4.2.1.1. La ecuación de Arrhenius

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad \text{Ec 3.4.2.1-1}$$

siendo:

μ : viscosidad dinámica [mPa·s]

A y B: constantes dependientes del líquido

T: es la temperatura absoluta en °C

Como se ve en la ecuación, la viscosidad disminuye con la temperatura. Esto es debido al hecho de que, conforme aumenta la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a una disminución de la viscosidad. Por este hecho se deben extremar las precauciones a la hora de medir la viscosidad, teniendo en cuenta que la temperatura debe permanecer prácticamente constante.

3.4.2.1.2. La ecuación de Poiseville (1840)

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \quad \text{Ec 3.4.2.1-2}$$

donde

μ_0 : la viscosidad dinámica a 0 ° C.

T: la temperatura en °C.

α, β : coeficientes constantes.

3.4.2.2. Gases

En cuanto a los gases, hay que decir que cuanto mayor es la temperatura, mayor es la agitación y los choques de las moléculas del gas, oponiéndose al movimiento (mayor fricción) y produciendo un aumento de la viscosidad del gas.

3.4.3. Variación de la viscosidad con la temperatura y la presión:

De las numerosas ecuaciones utilizadas para determinar la viscosidad en función de la temperatura y la presión (para líquidos tipo aceites lubricantes), se propone la de Barus:

$$\mu = \mu_0 \exp \left[AP - \frac{B}{T - T_0} \right] \quad \text{Ec 3.4.3-1}$$

En esta expresión:

μ_0 es la viscosidad a T_0 y a presión atmosférica.

A: 1/430

B: 1/36

3.4.4. Variación de la viscosidad con la presión.

La viscosidad (en líquidos) aumenta exponencialmente con la presión. El agua a menos de 30 ° C es el único caso en que disminuye. Los cambios de viscosidad con la presión son bastante pequeños para presiones distintas de la atmosférica. Para la mayoría de los casos prácticos,

el efecto de la presión se ignora a la hora de hacer mediciones con el viscosímetro.

Reología

4. CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de esfuerzos cortantes.

Las características reológicas de un fluido son uno de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en el ámbito industrial. Frecuentemente, éstas determinan las propiedades funcionales de algunas sustancias e intervienen durante el control de calidad, los tratamientos (comportamiento mecánico), el diseño de operaciones básicas como bombeo, mezclado y envasado, almacenamiento y estabilidad física, e incluso en el momento del consumo (textura).

Las propiedades reológicas se definen a partir de la relación existente entre fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, ya sea como deformación o flujo. Todo fluido se va a deformar en mayor o menor medida al someterse a un sistema de fuerzas externas. Dicho sistema de fuerzas se representa matemáticamente mediante el esfuerzo cortante " τ_{xy} ", mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad de deformación " $\dot{\gamma}$ ".

Como ejemplo se puede poner un elemento de fluido entre dos placas paralelas infinitas, donde la placa superior se mueve a una velocidad constante δu bajo la influencia de una fuerza aplicada F_x . La placa inferior permanece estática (Fig. 4.1-1). El movimiento de la placa superior da lugar a un gradiente de velocidad en el

fluido. Esta geometría puede ser usada para definir un parámetro reológico fundamental, el esfuerzo cortante o de cizalladura. Dicho esfuerzo se define como la fuerza por unidad de área necesaria para alcanzar una deformación dada, viniendo reflejado en la siguiente expresión:

$$\tau_{xy} = \lim_{\delta A} \left(\frac{\delta F_x}{\delta A_y} \right) = \left(\frac{dF_x}{dA_y} \right) \quad \text{Ec 4.1-1}$$

donde δA_y es el área del elemento de fluido en contacto con la placa. Las unidades del esfuerzo cortante son “mPa”.

Hay que buscar una alternativa para obtener el esfuerzo cortante de forma que sea medible fácilmente.

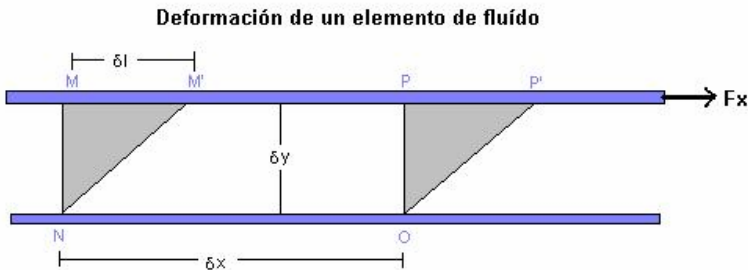


Fig. 4.1-1: Detalle del movimiento del fluido.

Durante un intervalo de tiempo δt el elemento de fluido se deforma desde la posición inicial M a la posición M' (de P a P'), variando un cierto ángulo $\delta\alpha$. Con la deformación aparece una cierta velocidad, denominada velocidad de deformación. Se define como el cambio de velocidad entre las dos placas, y su expresión es:

$$\gamma = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\delta \alpha}{\delta t} \right) = \left(\frac{d\alpha}{dt} \right) \quad \text{Ec 4.1-2}$$

Sustituyendo este último término por otro medible se puede calcular el esfuerzo cortante de una forma sencilla. Para ello, se puede ver en la figura que la distancia δl entre los puntos M y M' es:

$$\delta l = \delta u \cdot \delta t \quad \text{Ec 4.1-3}$$

siendo δu la velocidad de la placa superior y δt el tiempo que tarda el fluido en deformarse de M a M'. De manera alternativa para ángulos pequeños se ve que:

$$\delta l = \delta y \cdot \delta \alpha \quad \text{Ec 4.1-4}$$

Igualando ambas expresiones se obtiene:

$$\frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta y} \quad \text{Ec 4.1-5}$$

A continuación se toman límites a ambos lados y se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} = \gamma \quad \text{Ec 4.1-6}$$

Por lo tanto, el elemento de fluido de la figura, cuando se somete a un esfuerzo cortante " dF_x/dA_y " experimenta una velocidad de deformación dada por " du/dy ".

4.2. TIPOS DE FLUIDOS:

Existen 3 tipos de fluidos:

- Newtonianos (proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación).
- No Newtonianos (no hay proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación)
- Viscoelásticos (se comportan como líquidos y sólidos, presentando propiedades de ambos).

La relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad viene dada por la ecuación:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dt} = \mu \cdot \gamma$$

(Ley de viscosidad de Newton) Ec 4.2-1

siendo: τ_{xy} : esfuerzo cortante (mPa)

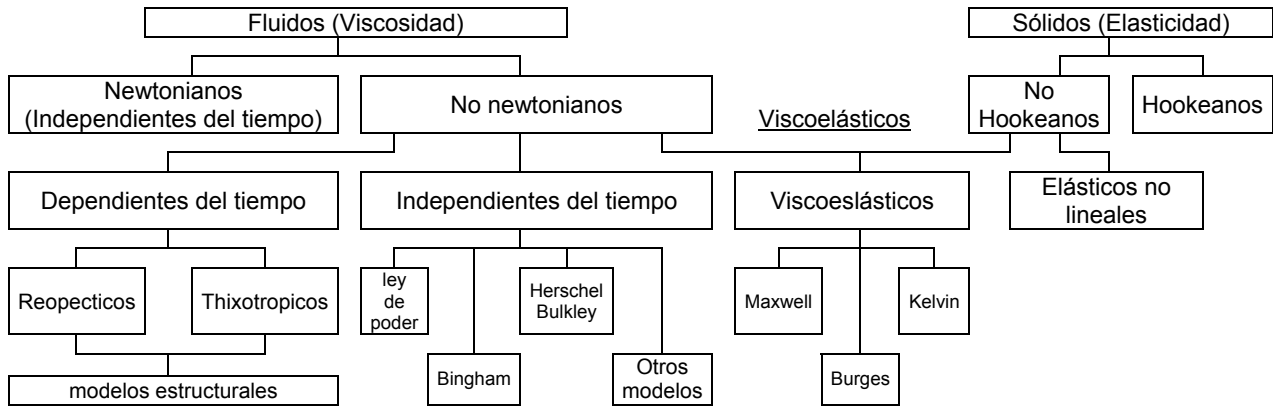
μ : viscosidad dinámica del fluido (mPa·s)

du/dy : velocidad de deformación del fluido (s^{-1}) =

γ

(estas unidades son las más utilizadas en reología)

Un esquema conciso de los tipos de fluidos existentes en Reología es el siguiente:



A continuación se va a describir detalladamente cada uno de ellos.

4.2.1. Fluidos newtonianos

Los newtonianos⁴ son fluidos en los que el deslizamiento relativo de los elementos de fluido al circular uno sobre otro es proporcional al esfuerzo cortante sobre el fluido, como se muestra en la Fig. 4.2.1. Todos los gases, -agua líquida y líquidos de moléculas sencillas (amoníaco, alcohol, benceno, petróleo, cloroformo, butano, etc.) son newtonianos. Las pastas, emulsiones, fluidos biológicos, polímeros, suspensiones de sólidos y otra mezclas son probablemente no newtonianos.

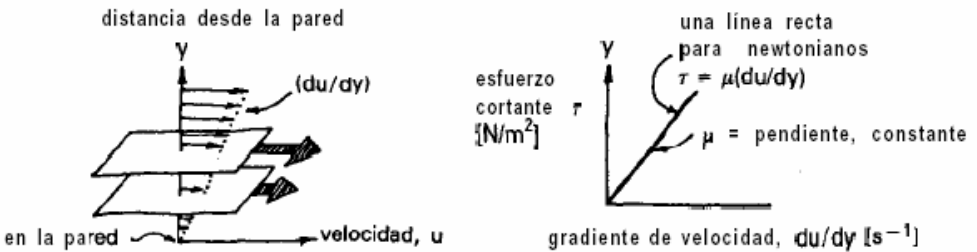


Fig 4.2.1-1 Representación de un fluido newtoniano
fuente: LEVENSPIEL, O. "FLUJO DE FLUIDOS E INTERCAMBIO DE CALOR"

Un fluido newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación (Ec. 4.2-

⁴ LEVENSPIEL, O. "FLUJO DE FLUIDOS E INTERCAMBIO DE CALOR", edición en español, Ed. Reverté, España, 1993, pág. 17

1). Si por ejemplo se triplica el esfuerzo cortante, la velocidad de deformación se va a triplicar también. Esto es debido a que el término μ (viscosidad) es constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo cortante aplicado.

Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Para una mejor comprensión de este tipo de fluido se representan dos tipos de gráficas, la “Curva de Fluidez” y la “Curva de Viscosidad”. En la Curva de Fluidez se grafica el esfuerzo cortante frente a la velocidad de deformación (τ vs $\dot{\gamma}$), mientras que en la Curva de Viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de deformación (μ vs $\dot{\gamma}$). Para un fluido newtoniano se obtienen las siguientes curvas (Figura 4.2.2):

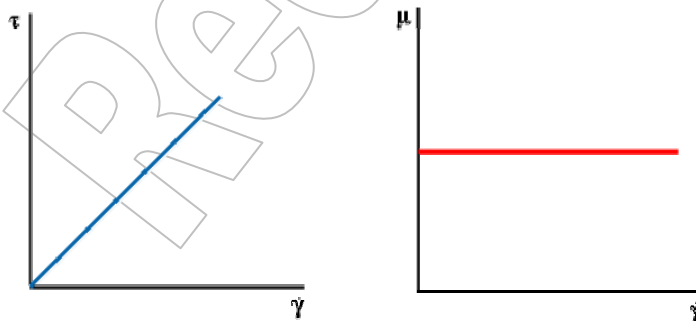


Fig 4.2.1-2 Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano

Como se puede observar en la curva de fluidez, el valor de la viscosidad μ es la tangente del ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación, la cual es constante para cualquier valor aplicado. Además se observa en la curva de viscosidad que la viscosidad es constante para cualquier velocidad de deformación aplicada.

La ecuación que modela un fluido newtoniano es la vista anteriormente.

4.2.2. Fluidos no newtonianos:

Los fluidos provocan⁵ y circulan sometidos a esfuerzos. Los fluidos newtonianos son los más sencillos y se caracterizan por la propiedad de que el gradiente de velocidad en un punto es proporcional al esfuerzo cortante en dicho punto. El resto de fluidos se denominan “no newtonianos”. El aire, el agua, el vapor de agua, todos los gases y la mayoría de fluidos constituidos por moléculas sencillas son newtonianos. Las suspensiones densas, lodos, emulsiones, soluciones de polímeros de cadena larga, fluidos biológicos, alimentos líquidos, pinturas, suspensiones de arcillas y mezclas de hormigón son, en general, no newtonianos.

La relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para fluidos no newtonianos no es lineal. Estos fluidos a su vez se diferencian en dependientes e independientes del tiempo.

⁵ Ibid. 4 pág. 88

4.2.2.1. Fluidos independientes del tiempo de aplicación:

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo umbral, es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

4.2.2.1.1. Fluidos sin esfuerzo umbral

a) Fluidos pseudoplásticos: (SHEAR-THINNING)

Este tipo de fluidos se caracterizan por una disminución de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de deformación. Su comportamiento se puede observar en las fig. 4.2.2-1 y fig. 4.2.2-2.

Se pueden dar dos explicaciones a este fenómeno, teniendo en cuenta que son simplificaciones ya que el flujo que se forma es bastante complejo:

- Flujo de varillas rígidas suspendidas en un líquido newtoniano: Como se puede observar en la fig 4.2.2-3, existen una serie de varillas desorientadas dentro del líquido newtoniano. Cada varilla, caracterizada por su movimiento browniano, tiene un vector de velocidad que tiende a adoptar una situación horizontal, dicho movimiento browniano (propuesto por Brown en 1827) es una observación indirecta de la agitación térmica de las moléculas de un líquido, al visualizarse el desplazamiento de partículas en suspensión en el seno del mismo.

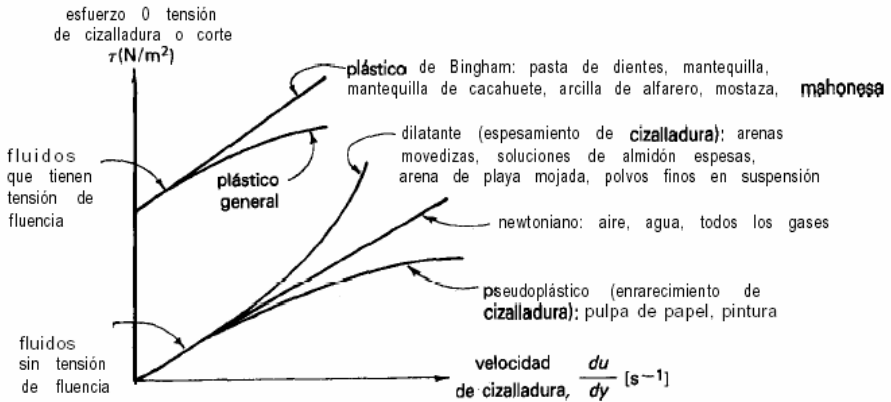


Fig 4.2.2-1 Esfuerzo frente a velocidad de cizalladura⁶ para diversos tipos de fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

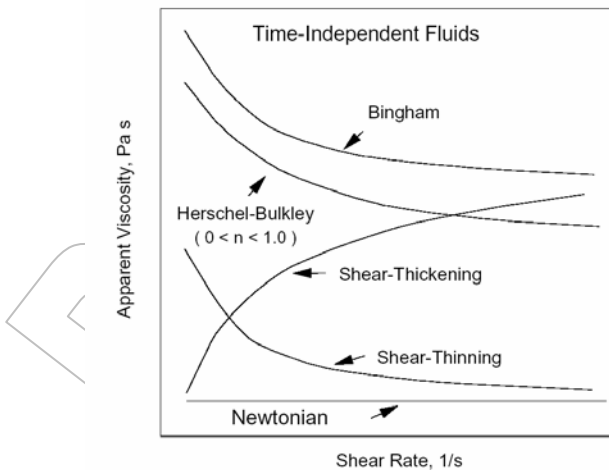


Fig 4.2.2-2 Viscosidad aparente frente a velocidad de cizalladura⁷.

⁶ Ibid. 4 pág. 90

⁷ Ibid. 6 Pág. 25

La resultante de los choques al azar es una fuerza de magnitud y dirección variable que a la orientación de las varillas, responsable de la viscosidad, para evitar que se llegue a un cierto estado de equilibrio. Cuanto mayor sea la orientación de las varillas, menor será la viscosidad del fluido (fig 4.2.2-3).

- Flujo de moléculas filamentosas en un líquido newtoniano: Se supone que, dentro de un fluido newtoniano situado entre dos placas paralelas, una de las cuales se mueve, aparecen una serie de macromoléculas en forma de filamentos porosos que contienen grupos de átomos con una gran movilidad.

Al principio estos grupos de átomos forman filamentos bastante enredados. Con el tiempo, al moverse la placa superior, la velocidad de deformación aumenta y la resultante de las fuerzas tiende a desenredar estos filamentos en la dirección del flujo, dependiendo de su elasticidad y de su velocidad de deformación, y además dicha fuerza libera parte del líquido que existe alrededor de la molécula. Como resultado de todo lo que ocurre en el seno del fluido se produce una disminución de la fricción interna dando lugar a su vez a una disminución de la viscosidad (Fig 4.2.2-4).

Tabla 4.2.2 Modelos reológicos⁸ que describen el comportamiento de fluidos independientes del tiempo

Model (Source)	Equation [*]
Casson (Casson, 1959)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_o)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{0.5}$
Modified Casson (Mizrahi and Berk, 1972)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_o)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1}$
Ellis (Ellis, 1927)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^{n_1}$
Generalized Herschel-Bulkley (Ofoli et al., 1987)	$\sigma^{n_1} = (\sigma_o)^{n_1} + K_1(\dot{\gamma})^{n_2}$
Vocadlo (Parzonka and Vocadlo, 1968)	$\sigma = \left((\sigma_o)^{-1/n_1} + K_1\dot{\gamma} \right)^{n_1}$
Power Series (Whorlow, 1992)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^3 + K_3(\sigma)^5 \dots$ $\sigma = K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^3 + K_3(\dot{\gamma})^5 \dots$
Carreau (Carreau, 1968)	$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_o - \eta_{\infty}) \left[1 + (K_1\dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}$
Cross (Cross, 1965)	$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{1 + K_1(\dot{\gamma})^n}$
Van Wazer (Van Wazer, 1963)	$\eta = \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{1 + K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^{n_1}} + \eta_{\infty}$
Powell-Eyring (Powell and Eyring, 1944)	$\sigma = K_1\dot{\gamma} + \left(\frac{1}{K_2} \right) \sinh^{-1}(K_3\dot{\gamma})$
Reiner-Philippoff (Philippoff, 1935)	$\sigma = \left(\eta_{\infty} + \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{1 + ((\sigma)^2/K_1)} \right) \dot{\gamma}$

^{*} K_1, K_2, K_3 and n_1, n_2 are arbitrary constants and power indices, respectively, determined from experimental data.

⁸ STEFFE, James F., Ph.D., P.E. "RHEOLOGICAL METHODS IN FOOD PROCESS ENGINEERING", 2a ed., Ed Freeman Press, USA, 1992. Pág. 24

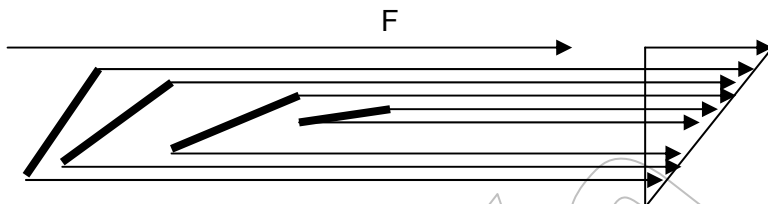


Fig 4.2.2-3 Representación de las varillas desorientadas dentro del fluido, habiendo aplicado una fuerza sobre la placa superior.

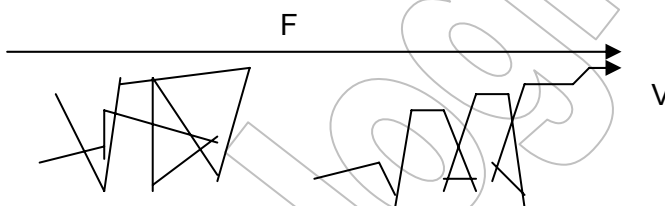


Fig 4.2.2-4 Los filamentos se van desenredando conforme aumenta la velocidad debido al movimiento de la placa superior.

Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: algunos tipos de ketchup, mostaza, algunas clases de pinturas, suspensiones acuosas de arcilla, etc.

b) Fluidos dilatantes: (SHEAR-THICKENING)

Los fluidos dilatantes son suspensiones en las que se produce un aumento de la viscosidad con la velocidad de deformación, es decir, un aumento del esfuerzo cortante con dicha velocidad.

El fenómeno de dilatancia se produce debido al fase dispersa del fluido. En dicho fluido tiene lugar un

empaquetamiento de las partículas, dejando a la fase continua casi sin espacio.

Si a continuación se aplica un esfuerzo, el empaquetamiento se altera y los huecos entre las partículas dispersas aumentan. Además, conforme aumenta la velocidad de deformación aplicada, mayor turbulencia aparece y más difícil es el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo cortante (la viscosidad aumenta).

Ejemplos de este tipo de fluidos son: la harina de maíz, las disoluciones de almidón muy concentradas, la arena mojada, dióxido de titanio, etc.

La ecuación matemática que describe un comportamiento dilatante es la ley de la potencia cambiando únicamente el valor de n , que debe ser menor que la unidad.

4.2.2.1.2. Fluidos con esfuerzo umbral, llamados también plásticos (viscoplásticos)

Este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo umbral) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido. La razón por la que se comportan así los fluidos plásticos es la gran interacción existente entre las partículas suspendidas en su interior, formando una capa llamada de solvatación. Están formados por dos fases, con una fase dispersa formada por sólidos y burbujas distribuidos en una fase continua.

En estos fluidos, las fuerzas de Van der Waals y los puentes de hidrógeno, producen una atracción mutua

entre partículas. También aparecen fuerzas de repulsión debidas a potenciales de la misma polaridad.

En este tipo de fluidos se forman coloides cuyas fuerzas repulsivas tienden a formar estructuras de tipo gel. Si las partículas son muy pequeñas poseen entonces una gran superficie específica, rodeados de una capa de adsorción formada por moléculas de fase continua. Gracias a esta capa, las partículas inmovilizan gran cantidad de fase continua hasta que no se aplican sobre ellas un esfuerzo cortante determinado.

Los fluidos plásticos, a su vez, se diferencian en la existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, a partir de su esfuerzo umbral. Si existe proporcionalidad, se denominan fluidos plásticos de Bingham y si no la hay, se denominan solo plásticos.

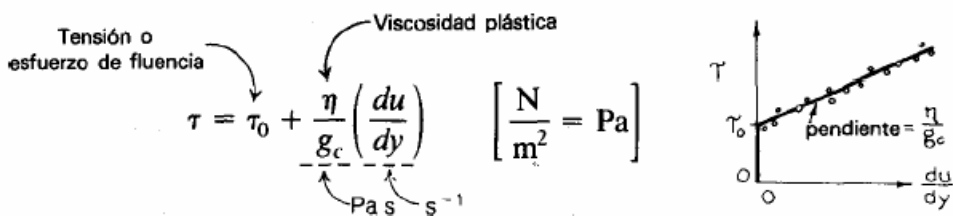


Fig 4.2.2-5 Plástico de Bingham⁹.

Algunos ejemplos de comportamiento plástico son el chocolate, la arcilla, la mantequilla, la mayonesa, la pasta de dientes, las emulsiones, las espumas, etc.

⁹ Ibid. 4 pág. 91

4.2.2.2. Fluidos dependientes del tiempo de aplicación:

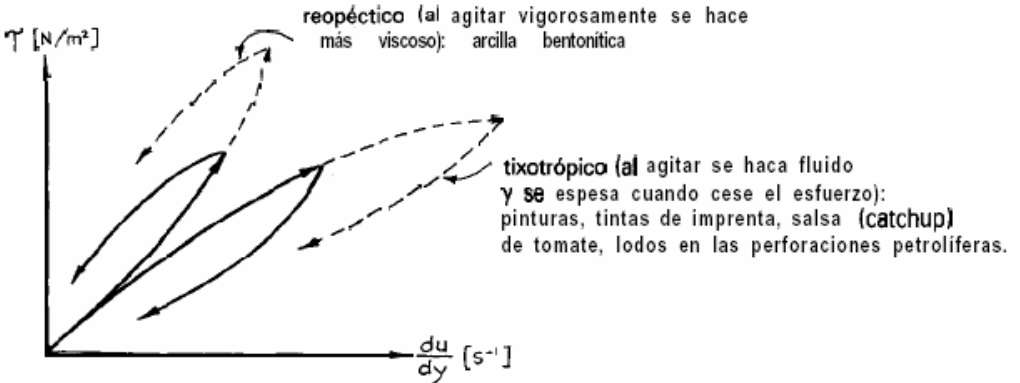


Fig 4.2.2-6 Esfuerzo frente a velocidad de cizalladura¹⁰ para las dos clases de fluidos no newtonianos, dependientes del tiempo, pero no elásticos.

Este tipo de fluidos se clasifican en dos tipos: los fluidos tixotrópicos, en los que su viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado, y los fluidos reopécticos, en los cuales su viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación de la fuerza y vuelven a su estado anterior tras un tiempo de reposo.

¹⁰ Ibid. 4 pág. 91

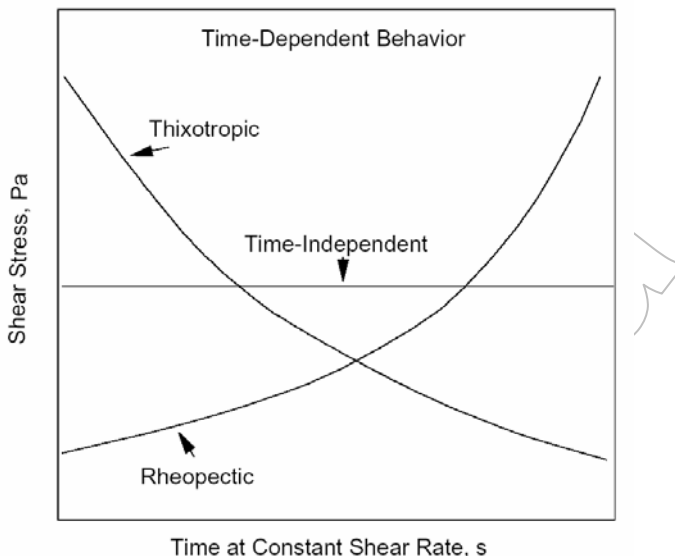


Fig 4.2.2-7 Comportamiento de fluidos dependientes del tiempo¹¹.

4.2.2.2.1. Fluidos Tixotrópicos

Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo. Esto produce la rotura de las largas cadenas que forman sus moléculas.

Dichos fluidos, una vez aplicado un estado de cizallamiento (esfuerzo cortante), sólo pueden recuperar su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza debido a

¹¹ Ibid 6. Pág. 28

la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio. Aparece un fenómeno de Histéresis

Las razones de este comportamiento son diversas. Si se considera al fluido como un sistema disperso, se debe tener en cuenta que las partículas que hay en él poseen diferentes potenciales eléctricos y tienden a formar tres estructuras variadas dependiendo de cómo sea la fase dispersa.

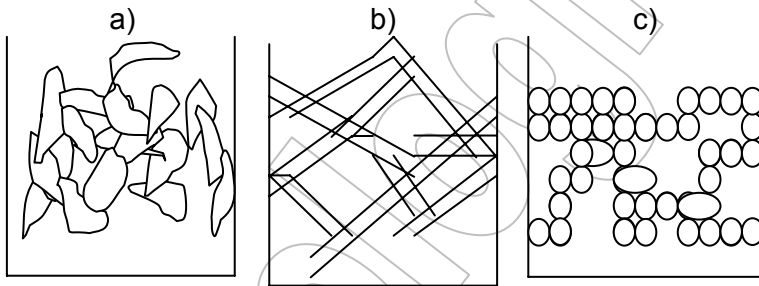


Fig 4.2.2-8 a) Fase dispersa tipo Card House o “Castillo de cartas”. b) Fase dispersa denominada de “Armadura”. c) “Estructura tipo perlas encadenadas”

Si la fase dispersa está formada por una serie de capas se denomina “Castillo de cartas, Card House” (Fig 4.2.2-8a), si en cambio se compone de una serie de varillas se denomina “Armadura” (Fig 4.2.2-8b), y si la fase dispersa está compuesta por formas esféricas se denomina “Estructura de perlas encadenadas”(Fig 4.2.2-8c). Las fuerzas que actúan en estas estructuras son de tipo electrostático y se originan por el intercambio de iones dentro del fluido, el cual provoca atracciones y

repulsiones entre ellos que dan lugar a cambios estructurales.

Estos cambios estructurales hacen que disminuya la viscosidad con el aumento de la velocidad de deformación y que ésta esté muy influenciada por el tiempo. La estructura puede volver a recuperar su forma inicial dejándola un tiempo en reposo.

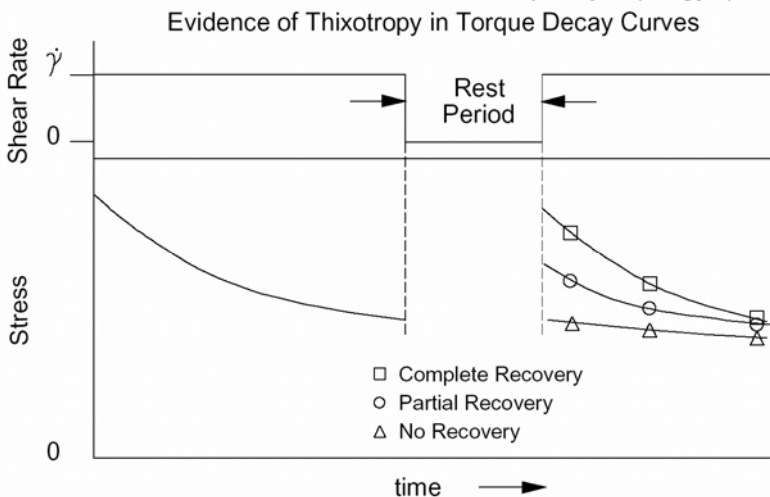


Fig 4.2.2-9 Comportamiento de fluidos dependientes del tiempo¹².

Para diferenciar de forma sencilla un fluido tixotrópico, se aumenta la velocidad de deformación hasta un determinado valor y luego se disminuye hasta el reposo, observando entonces un fenómeno de histéresis, que ayuda a comprender la variación de la viscosidad. Ejemplos típicos de fluidos tixotrópicos son: las pinturas,

¹² Ibid. 6 Pág. 29

el yogur, las tintas de impresión, la salsa de tomate, algunos aceites del petróleo, el nylon, etc. Para modelizar la variación de la viscosidad con el tiempo, se ideó la siguiente ecuación:

$$\mu(t) = \mu_0 - \int_{-\infty}^t M_T(t-t') \frac{df(D^2)}{dt'} dt' \quad \text{Ec 4.2-2}$$

donde,

$$M_T(t-t') = \int_0^{\infty} \frac{R(\text{II})}{\text{II}} \exp\left[-\frac{(t-t')}{\text{II}}\right] d\text{II} \quad \text{Ec 4.2-3}$$

siendo,

II: el tiempo de relajación del fluido, es decir, el tiempo que tarda el fluido en disminuir su tensión a 1/e veces. Puede haber diversos tiempos de relajación.

R(II): función de distribución de tiempos de relajación.

μ_0 : viscosidad inicial sin perturbaciones.

F(D²): función simétrica de la velocidad de deformación.

4.2.2.2. Fluidos reopécticos

Los fluidos reopécticos, en cambio, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada y presentan una histéresis inversa a estos últimos.

Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa ésta

se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad.

Las curvas de fluidez y de viscosidad de los fluidos reopécticos se representan en las fig. 4.2.2-6 y fig. 4.2.2-7. Existen pocos fluidos de este tipo. Algunos ejemplos son: el yeso y la arcilla bentonítica, entre otros.

4.2.3. Fluidos viscoelásticos:

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos. Ejemplos de fluidos viscoelásticos son la nata, la gelatina, los helados, etc. La ecuación que describe el comportamiento viscoelástico está basada en el modelo de Maxwell:

$$\tau + \lambda \cdot \dot{\tau} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Ec 4.2-4}$$

donde,

τ : esfuerzo cortante aplicado.

λ : tiempo de relajación.

$\dot{\tau}$: gradiente de esfuerzos cortantes (μ/G).

μ : viscosidad aparente.

$\dot{\gamma}$: velocidad de deformación.

Éste modelo se puede representar como el modelo mecánico de la siguiente figura:

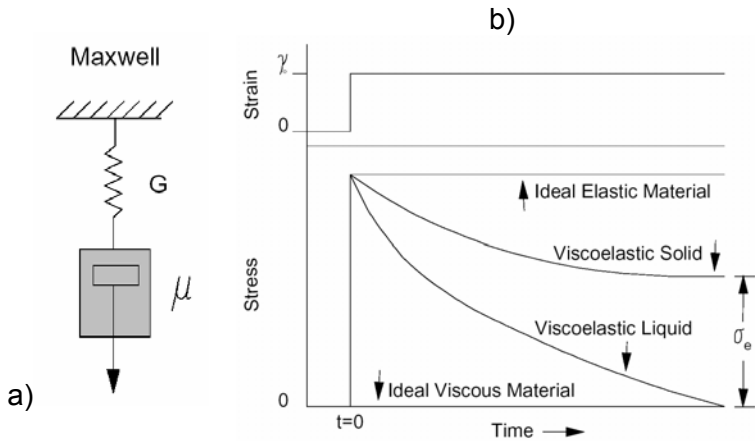


Fig 4.2.3-1 a) Modelo de Maxwell¹³. b) Relación de curvas de esfuerzo

¹³ Ibid. 6 Pág. 298 - 299

5. BIBLIOGRAFÍA

- ALVARADO, J. de D. **“PRINCIPIOS DE INGENIERÍA APLICADOS A ALIMENTOS”**. Ed. Radio Comunicaciones, Quito, Ecuador. 1996
- MCCABE W. et al. **“OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA”**, 4ª ed., Ed. McGraw Hill, España, 1998,
- LEVENSPIEL, O. **“FLUJO DE FLUIDOS E INTERCAMBIO DE CALOR”**, edición en español, Ed. Reverté, España, 1993
- PERRY, Robert, et al. **“MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO”**, 7ª ed., Ed. McGraw Hill, USA, 1997
- GEANKOPLIS, C. J. **“PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS”**. 3ª ed., Compañía Editorial Continental. México. 1999
- STEFFE, James F., Ph.D., P.E. **“RHEOLOGICAL METHODS IN FOOD PROCESS ENGINEERING”**, 2a ed., Ed Freeman Press, USA, 1992