



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

REOLOGÍA EN EL DÍA A DÍA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

ALOHA IXEL CISNEROS SÁNCHEZ



CDMX 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Dr. CRUZ GÓMEZ MODESTO JAVIER

VOCAL: Profesor: Dr. LÓPEZ AGUILAR JOSÉ ESTEBAN

SECRETARIO: Profesor: Dr. AGUAYO VALLEJO JUAN PABLO

1er. SUPLENTE: Profesor: Dr. JANSSEN CAMIEL HERMAN CORNELIS

2° SUPLENTE: Profesor: Dr. LOPEZ SERRANO RAMOS FRANCISCO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA

ASESOR DEL TEMA:

Dr. AGUAYO VALLEJO JUAN PABLO

SUPERVISOR TÉCNICO :

KAREN YESENIA PÉREZ SALAS

SUSTENTANTE (S):

ALOHA IXEL CISNEROS SÁNCHEZ



Índice de contenido

Agradecimientos	
Introducción	2
Objetivo	6
Capítulo I. Panorama general	7
Capítulo II. Tipos de fluidos	14
Capítulo III. Definición de Reología	23
Capítulo IV. Fenómenos reológicos	53
Capítulo V. Curiosidades de la reología	69
Conclusiones	77
Bibliografía.	78



Índice de Figuras

Figura 1. Sólido Rígido	8
Figura 2. Sólido Elástico	9
Figura 3. Fluidos Viscosos	10
Figura 4. Representación del comportamiento viscoelástico de un material mediante los modelos a) Kelvin, b) Maxwell, c) Burgers y d) Maxwell generalizado	12
Figura 5. Comportamiento del flujo en azúcar y café	14
Figura 6. Curva de flujo de fluido newtoniano	17
Figura 7. Viscosidad de flujo de fluido newtoniano (Miel Karo)	18
Figura 8. Diagrama de esfuerzos de fluidos viscoelásticos.	21
Figura 9. Representación del movimiento de un fluido entre placas paralelas horizontales en presencia de flujo F	30
Figura 10. Representación del esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte, con flujo laminar y turbulento	35
Figura 11. Tipos de comportamiento a) elástico b) viscoso y c) viscoelástico	39
Figura 12. Curva maestra para los módulos de almacenamiento y pérdida en el dominio de la frecuencia	42
Figura 13. Variación de G' en función de la temperatura en el queso.	44
Figura 14. Esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte de mayonesa Hellmann's ligera, Hellmann's mayonesa, Heinz mayonesa y Heinz mayonesa ligera	47
Figura 15. Esfuerzo oscilatorio vs el módulo complejo de los diferentes tipos de mayonesa.	49
Figura 16. Visualización de cuatro tipos de corte	51
Figura 17. Comportamiento de la velocidad de corte vs esfuerzo cortante de algunos modelos reológicos con un límite elástico.	55
Figura 18. Proceso de envejecimiento en la crema de afeitar comercial Nivea.	58
Figura 19. Componentes del tensor de esfuerzos con dirección de flujo	61
Figura 20. Estructura polimérica antes, durante la deformación por corte y durante la deformación por flujo	63



Figura 21. Ejemplo del efecto Weissenberg	64
Figura 22. Ejemplo del efecto de hinchamiento	66
Figura 23. Ejemplo del efecto Sifón	68
Figura 24. (a) Un gato aparece como sólido con una forma consistente, girando y rebotando, en escalas de tiempo cortas. Tenemos $De \gg 1$ porque el tiempo de observación es inferior a un segundo.(b) A escalas de tiempo mayores, un gato fluye y llena una copa de vino vacía. En este caso tenemos $De \ll 1$. En ambos casos, incluso si las muestras son diferentes, podemos estimar que el tiempo de relajación está en el intervalo $T = 1 \text{ s a } 1 \text{ min}$ (figuras c-d).	71
Figura 25. Esfuerzo de cedencia en comercial de cátsup y salsa tipo cátsup	72
Figura 26. Un fluido no newtoniano en un programa de televisión	73
Figura 27. Diferencia de viscosidad en aceites de automóviles en comercial	74



Introducción

La reología es la disciplina científica encargada de estudiar el flujo y deformaciones de la materia, es decir, que estudia las consistencias de los materiales. Las aplicaciones de la reología están presentes en la mayoría de los materiales que utilizamos o consumimos en nuestro día a día, algunos ejemplos son: las pinturas, aceites, gelatinas, cremas, jabones, geles, entre muchos otros. Las consistencias de algunos materiales son parecidas, pero tienen características diferentes, por ejemplo: el yogurt griego, es más espeso que el yogurt bebible. Si nos centramos en sus consistencias, ninguna de las mencionadas es precisamente líquida, ni totalmente sólida, más bien presenta características de ambos tipos. A esta consistencia se le conoce como viscoelástico; como su nombre lo dice, tiene características elásticas bajo algunas condiciones y características viscosas bajo otras, para definir las características y las condiciones en las que se presentan, es necesario recordar las características que distinguen los materiales líquidos de los sólidos.

Los materiales líquidos no poseen una estructura definida y cuando se le aplica una fuerza (esfuerzo cortante) se obtiene un flujo, a esto le conocemos como estado líquido; una vez que se retira el esfuerzo, el material recupera su estado de reposo sin tratar de recuperar su "forma" original. Un sólido es un material que manifiesta un rebote elástico ante la aplicación de esfuerzo, esto se debe a que almacena energía de deformación en forma de elasticidad y cuando se elimina el esfuerzo aplicado el material recupera su forma original, algunos ejemplos de materiales elásticos son: las bandas de hule, las pelotas de golf, los trampolines, las pelotas de fútbol y los resortes.



Por otro lado, existen dos tipos de materiales viscoelásticos: líquidos y semisólidos. Los líquidos viscoelásticos se definen como aquellos que en reposo están en estado líquido, pero cuando se someten a esfuerzos relativamente rápidos, presentan comportamiento elástico parcial; algunos ejemplos de estos son el shampoo, el slime y algunos detergentes líquidos. Entre estos ejemplos, el que mejor representa este comportamiento es el slime, el cual es un fluido que si el proceso es rápido se puede estirar y si se deja en reposo suficiente tiempo (varios minutos), fluye regándose por la superficie. Ahora bien, sobre los semisólidos viscoelásticos, si a estos materiales se les aplica un esfuerzo rápido tienen un comportamiento de recuperación (elástico), además pueden presentar el fenómeno de esfuerzo de cedencia, el cual, si el esfuerzo aplicado es menor al esfuerzo de cedencia parecen materiales sólidos; como ejemplos de sólidos viscoelásticos están: mayonesa, cátsup (kétchup) original, boligoma, espumas, etc.

Dos de las características de los materiales en los que se enfoca el estudio de la reología, son la elasticidad y la viscosidad, por esta razón el comportamiento viscoelástico es de gran interés. Cuando a un material viscoelástico se le aplica una fuerza, el material se deforma, sin embargo, parte de esta deformación es reversible (por la elasticidad) mientras que otra parte no (efecto viscoso).

Un postulado de la Reología es que *Todo puede fluir si esperas el tiempo adecuado*, existen varios tipos de fluidos que debido a sus propiedades reológicas pueden tardar un tiempo considerable para fluir, es más, por un tiempo existía la creencia acerca de la estructura de los vidrios de las catedrales antiguas, se dice que son más gruesos



en la parte inferior que en la parte superior y esto se explicaba a que el vidrio es un líquido que fluye muy lentamente. Primero que todo, hay que aclarar que el vidrio y el cristal no son lo mismo. El vidrio es un sólido el cual tiene una estructura atómica que no están situadas de forma regular, por otro lado, en el cristal las moléculas y átomos sí están acomodados de forma regular. Segundo, la suposición de que el vidrio de los ventanales de las catedrales fluyera es falsa, ya que no hay evidencia científica que respalde este hecho [1]. Sin embargo, esto da lugar a discutir el concepto de tiempo de relajación. El tiempo de relajación tiene que ver con el tiempo en que un material trata de recuperar su estado previo a la deformación a la que fue sometido. Un sólido elástico regresa a su estado inicial, mientras que un material viscoelástico (líquido o semisólido) recupera parcialmente el estado previo a la deformación, debido a que la viscosidad provoca una pérdida irreversible de energía, lo que impide que la relajación del material regrese a su acomodo molecular inicial. Por esta razón si un polímero es deformado por una fuerza durante un tiempo largo, sus cadenas se reacomodan y toman la posición más favorable, esta es, la de menor energía [2].

Es importante el estudio de la reología, porque se ha logrado la mejora de las consistencias de los materiales cotidianos, el cual beneficia su uso, la duración y la aplicación de los mismos, algunos ejemplos son: el pegamento líquido, el aceite para automóviles, pinturas impermeables; las mismas aplicaciones para uso médico, como por ejemplo, las gotas lubricantes de ojos que deben tener una consistencia tal que se logra recubrir y lubricar el ojo, y no debe ser tan espesa, porque se sentiría casi como tener miel en el ojo, tampoco puede ser tan líquida porque al parpadear el



medicamento saldría expulsado. Otra rama de aplicación es la cosmética, en donde ayuda a mejorar la duración y distribución de los productos en la piel, así como de la pasta de dientes, jabones, lociones. También se ha logrado la caracterización de hidrocarburos, dar estabilidad a las emulsiones y suspensiones, entre otras aplicaciones [3].



Objetivo

Difundir el conocimiento de la reología como disciplina en nuestro día a día, tras una revisión histórica y bibliográfica.

Se menciona en específico a la reología ya que es una ciencia poco divulgada, porque es relativamente nueva y es más cotidiana de lo que percibimos, encontramos sus aplicaciones en prácticamente cualquier producto de uso y consumo diario; cuyas características reológicas han sido desarrolladas con el objetivo de mejorar su calidad.



Capítulo I. Panorama general

En esta sección se presenta brevemente los antecedentes históricos acerca de la evolución de la reología y el lapso antes del nacimiento de la misma. Esto con el motivo de conocer todas las disciplinas con las que comparte el objeto de estudio, para tener diferentes perspectivas del tema.

Antecedentes históricos

El inicio de estudio formal de la reología como disciplina, comienza con el comportamiento de los materiales ideales, para después enfocarse en modelar los escenarios en la realidad.

Dentro del estudio de los materiales ideales se encuentran:

Sólidos Rígidos: El tema de la mecánica, en general trata de cuerpos ideales en los que sólo es relevante la masa de los cuerpos (la geometría euclidiana se basa en cuerpos rígidos que no sufren deformaciones). De hecho, en la obra “Principia” de Newton se ocupaban principalmente de la mecánica de los cuerpos. La mecánica de los cuerpos rígidos es la rama más antigua de las ciencias físicas y conviene recordar la historia de Arquímedes, quien afirmaba que podía mover el mundo si se le proporcionaba la palanca adecuada [4]. En la Figura 1 Se encuentra un ejemplo de sólido rígido.



Figura 1. Sólido Rígido

Fuente: Fuente de Cibele (Ciudad de México) Autora: Aloha Cisneros.

Sólidos Elásticos: En 1678, Robert Hooke [4] asentó la teoría de la elasticidad. Propuso que "la fuerza de cualquier resorte es proporcional a la tensión del mismo", esto quiere decir que si se duplica el esfuerzo se duplicará también la extensión. Esto constituye la premisa de la teoría de la elasticidad clásica (tensión infinitesimal) [4] (ver Figura 2).



Figura 2. Sólido Elástico

Fuente: Elaboración propia

Fluidos sin viscosidad: Una clase de materiales ideales son los llamados fluidos pascalianos (o no viscosos) que no presentan resistencia al flujo. En 1663, Blaise Pascal hizo la primera afirmación equivalente de que la presión en un líquido es la misma en todas las direcciones (aunque el principio del fluido ideal fue concebido por Arquímedes en la época clásica). El campo de la hidrodinámica, que se ocupa del movimiento de los fluidos sin considerar su viscosidad, se desarrolló a finales del siglo XVIII gracias a los estudios clásicos de Bernoulli (1738) [4] y Euler (1755) [4].

Fluidos Viscosos: Isaac Newton prestó atención a los líquidos en su obra "Principia", publicada en 1687, aparece la siguiente hipótesis: "La resistencia que surge de la falta de deslizamiento de las partes del líquido, en igualdad de condiciones, es proporcional a la velocidad con la que las partes del líquido se separan unas de otras" [4].

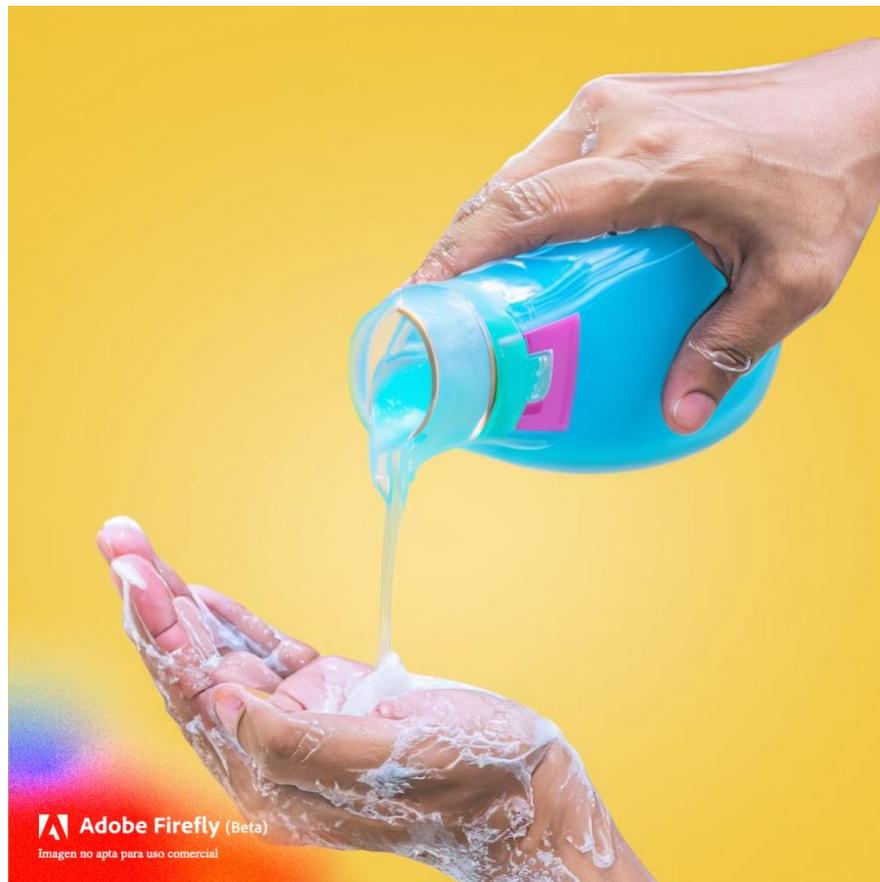


Figura 3. Fluidos Viscosos

Fuente: Elaboración propia

Los primeros trabajos sobre viscoelasticidad, de Hagen (1839) [4], se orientaron hacia el comportamiento de fluencia y relajación de los metales. El primer estudio sistemático de materiales que no eran ni hookeanos ni newtonianos lo realizó Weber (1835) [4] utilizando hilos de seda (por su aplicación en instrumentos



electromagnéticos). El remover el esfuerzo extensional provoca una contracción inmediata, seguida de una contracción gradual hasta alcanzar la longitud inicial (sin alcanzarla por completo) había identificado el fenómeno de la relajación de tensiones (que denominó "efecto posterior"). Así pues, Weber había captado cualitativamente el fenómeno de la viscoelasticidad incluso antes de los resultados de Poiseulle sobre el flujo de tubos y los trabajos de Stokes sobre los líquidos viscosos. Posteriormente, Kohlarusch estableció experimentalmente la linealidad del fenómeno en 1863 basándose en sus trabajos con el vidrio. Durante este período, Maxwell (1867) realizó una importante contribución a la reología, postulando su famosa ecuación diferencial empírica de primer orden que relaciona el esfuerzo de corte con la deformación y la relajación exponencial de esfuerzos que la acompaña [4].

Debido a que el comportamiento reológico de materiales viscoelásticos es difícil de visualizar, se suelen emplear modelos mecánicos para su representación. En esos modelos se representa el comportamiento de un fluido de Newton como un pistón trabajando en un cilindro, mientras que un comportamiento elástico como el de un sólido de Hooke se suele representar como un resorte. El pistón representa la disipación de energía, mientras que el resorte representa la energía almacenada en el cuerpo. Estos modelos son muy sencillos y en muy pocos casos correlacionan adecuadamente los resultados experimentales; se pueden obtener mejores resultados con el modelo de Burgers, la cual consta de un elemento de Maxwell (el modelo de muelle) y otro de Kelvin (el modelo de pistón) en serie. La calidad de los ajustes

mejora, a costa de introducir modelos con un mayor número de parámetros [2]. En la Figura 4 se encuentra la representación de los modelos mencionados.

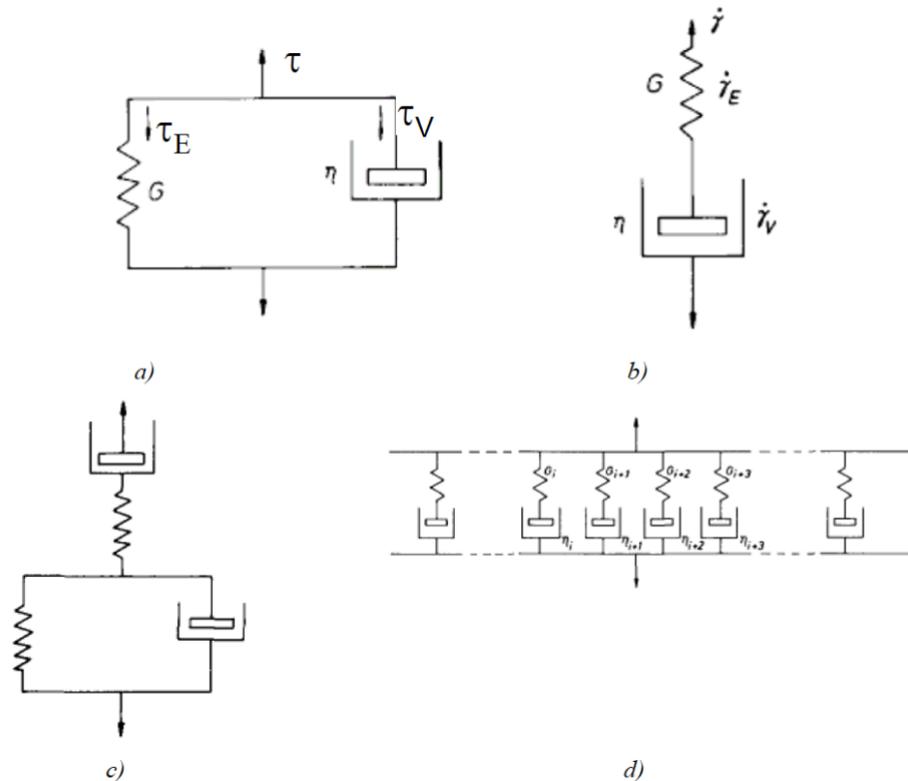


Figura 4. Representación del comportamiento viscoelástico de un material mediante los modelos a) Kelvin, b) Maxwell, c) Burgers y d) Maxwell generalizado

Fuente:[2]

El trabajo experimental de Schweddoff (1890) [4] sobre soluciones de gelatina coloidal utilizando un dispositivo de Couette fue uno de los primeros resultados sobre sistemas no newtonianos. Sus datos indicaron la no linealidad de los datos de velocidad angular en un instrumento de Couette; también tuvo que incorporar un valor de rendimiento para describir sus resultados. Hess (1910) [4] y Hatcheck (1913) [4] fueron otros pioneros que postularon que la viscosidad era una función de la velocidad de corte,



basándose en resultados análogos a los de Schwedoff para los sólidos de gelatina; Trouton y Andrews (1904) [4], en sus estudios, tuvieron que restar una pequeña "tensión inicial" para obtener un flujo proporcional a la tensión. Este tipo de comportamiento de los fluidos se asocia ahora a Bingham (1922) [4], que propuso un "límite elástico" para describir el flujo de las pinturas. Las primeras ecuaciones para las viscosidades dependientes de la rapidez de corte fueron propuestas por Ostwald (1925)- de Waele (1923) [4], Herschel y Bulkeley (1926) [4].

Capítulo II. Tipos de fluidos

En este capítulo se hablarán de los diferentes tipos de fluidos, ya que la materia existe en diferentes consistencias.

La diferencia de los fluidos es debido a sus propiedades reológicas, un fluido puede cambiar de forma, de manera continua cuando está sometido a un esfuerzo cortante, por muy pequeño que sea. Unos líquidos se moverán más lentamente que otros, sin embargo estarán en movimiento, la medida o más bien, la resistencia que presenta un líquido al moverse se llama viscosidad.

La característica que distingue a un sólido de un líquido es la capacidad que tienen estos últimos para moverse o fluir, el siguiente experimento casero servirá para explicar esto, vierta una taza de azúcar sobre una mesa, si se hace con cuidado, producirán un montón de azúcar que tiene una forma casi cónica, como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Comportamiento del flujo en azúcar y café

Fuente: Elaboración propia / [5]



Analizando la superficie exterior de la pila de azúcar, se observa que los granos de azúcar de esta superficie deben estar soportando algún esfuerzo de corte inducido por las fuerzas gravitatorias, pero la forma de la pila no cambia, por lo tanto, no hay deformación; podemos concluir que el azúcar no es un fluido. Por el contrario, si se derrama una taza de café en la mesa, el café se extenderá por la superficie de la mesa, el café no puede "amontonarse", los esfuerzos cortantes inducidos por las fuerzas gravitacionales no pueden soportarse y se produce una deformación, por lo tanto el café es un fluido. Teniendo en cuenta que la estructura de las sustancias granulares, como el azúcar, es muy diferente a la de los fluidos, (de nuevo, utilizando el azúcar como ejemplo,) se puede observar que la interacción entre pares de granos de azúcar es muy diferente a las interacciones que se producen a nivel microscópico para los átomos y/o las moléculas (o incluso las partículas de fluido). Una de las diferencias más importantes es el de la fricción, en este caso la fricción presente es la fuerza de fricción estática, la cual es generada por el movimiento de los granos de azúcar entre sí. Esta es la principal razón por la que estos materiales granulares son capaces de soportar algunos esfuerzos de corte sin deformarse y sin fluir, recordando que, a pesar de estas diferencias físicas fundamentales entre los fluidos y otras sustancias similares que fluyen; las ecuaciones del movimiento de los fluidos que se desarrollan y estudian se utilizan a menudo para los cálculos prácticos [5].

La fuerza de fricción estática F_s , es una fuerza entre dos superficies que impide que estas se deslicen o resbalen una sobre la otra. Esta es la misma fuerza que te permite acelerar hacia adelante cuando corres. Tu pie plantado en el suelo puede agarrarse a



este y empujarlo hacia atrás, lo que provoca que el suelo empuje tu pie hacia adelante. Le llamamos fuerza de fricción estática a este tipo de fricción "de agarre", donde las superficies no pueden deslizarse una sobre la otra. Si no hubiera ningún tipo de fricción entre tu pie y el suelo, serías incapaz de empujarte hacia adelante al correr [6].

Aun cuando dos superficies se deslicen una sobre la otra, puede haber una fuerza de fricción entre ellas, pero a esta la llamamos fuerza de fricción dinámica o cinética. La fuerza de fricción dinámica F_d , siempre se opone al deslizamiento y trata de reducir la rapidez a la cual las superficies se deslizan una sobre la otra. Por ejemplo, una persona barriéndose a segunda base durante un juego de béisbol está usando la fuerza de fricción dinámica para frenarse. Si no hubiera fricción dinámica, el jugador de béisbol continuaría deslizándose (sí, esto haría que robar bases fuera extremadamente difícil) [6].

Newtonianos.

Los fluidos newtonianos se definen como aquellos cuyo esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación. La viscosidad newtoniana es la constante de proporcionalidad, y de dicha viscosidad depende la temperatura y la presión, no de las características de flujo. El diagrama que relaciona el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación se llama curva de flujo. En el caso de los fluidos newtonianos es una línea recta que pasa por el origen y cuya pendiente es igual a la viscosidad (a temperatura y presión constantes); esta se encuentra ilustrada en la Figura 6.

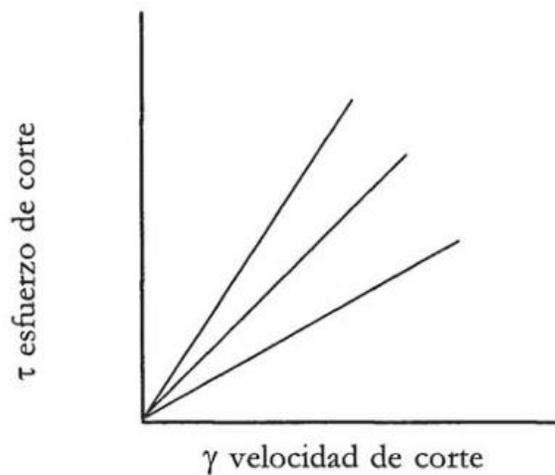


Figura 6. Curva de flujo de fluido newtoniano

Fuente: [7]

El flujo de un líquido newtoniano puede ilustrarse gráficamente por el coeficiente de viscosidad (Pa·s), en función de la rapidez de corte (s^{-1}). En la Figura 7 se muestra un ejemplo del flujo de miel karo, el cual es un fluido newtoniano conocido [7].

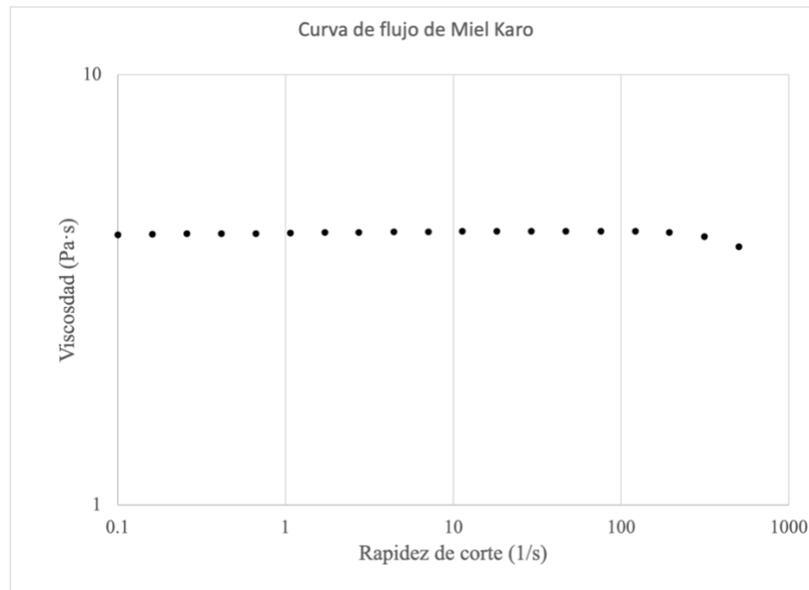


Figura 7. Viscosidad de flujo de fluido newtoniano (Miel Karo)

Fuente: Elaboración propia

Los fluidos newtonianos tienen un comportamiento que se puede clasificar con las características enlistadas a continuación, manteniendo temperatura y presión constantes:

1. La viscosidad cortante no varía con la rapidez de corte.
2. La viscosidad es constante con respecto al tiempo y la tensión en el líquido cae a cero inmediatamente cuando se detiene la deformación.
3. Las viscosidades medidas en diferentes tipos de deformación están siempre en proporción simple entre sí, así, por ejemplo, la viscosidad medida en un flujo extensional uniaxial es siempre tres veces el valor medido en un flujo de corte simple [8].



Algunos ejemplos de fluidos newtonianos comunes en el día a día se encuentran en el siguiente listado:

- Agua
- Gasolina
- Benceno
- Bebidas carbonatadas
- Bebidas alcohólicas
- Leche
- Alcohol etílico
- Ciertos aceites
- Aire
- Mercurio



No newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no satisfacen la ecuación constitutiva newtoniana, es decir, que los fluidos no newtonianos, aún a temperatura y presión constantes, presentan una curva de flujo no lineal, inclusive en caso de ser lineal puede no pasar por el origen. Los fluidos no newtonianos pueden ser clasificados en las siguientes categorías:

- Fluidos dependientes del tiempo.

Donde el esfuerzo cortante es función tanto de la magnitud como de la duración de la velocidad de deformación. Estos pueden ser tixotrópicos, los fluidos tixotrópicos son aquellos que forman una estructura que se puede recuperar cuando se regresa a la situación de flujo previa.

- Fluidos independientes del tiempo.

Donde el esfuerzo cortante en cualquier punto depende de la velocidad de deformación instantánea en ese punto. Estos pueden ser pseudoplásticos, son aquellos fluidos que disminuyen su viscosidad al aumentar la gradiente de velocidad. Sin embargo, a velocidades muy altas, la viscosidad se hace casi constante.

- Fluidos viscoelásticos.

Los cuales tiene características de sólidos elásticos y fluidos viscosos. Exhiben una recuperación elástica parcial después de haber sido sometidos a un esfuerzo de corte [7].

En la Figura 8 se encuentra gráfica del comportamiento de los fluidos viscoelásticos.

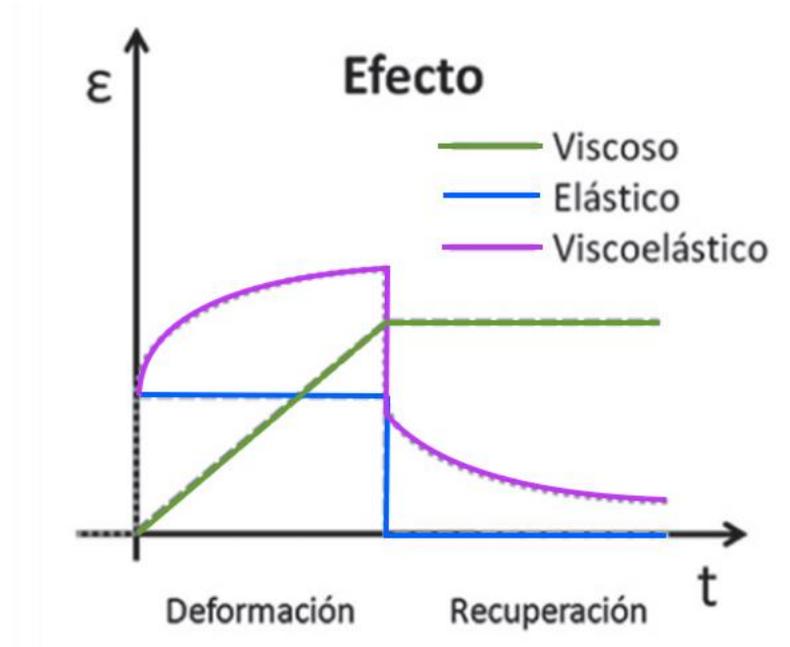


Figura 8. Diagrama de esfuerzos de fluidos viscoelásticos.

Fuente: [9]

Se observa que los fluidos que tienen una fracción elástica cumplen con la ley de Hooke (modelo del resorte) y aquellos que tienen una fracción viscosa obedecen la ley de Newton (efecto amortiguador). Cuando son sometidos estos tipos de fluidos a cargas que posteriormente son removidas, la deformación que se presenta solo se restablece en la fracción elástica del fluido; la fracción viscosa del fluido permanecerá deformada por tanto se podría afirmar que la recuperación no es completa.

Ciertos ejemplos de fluidos no newtonianos se encuentran enlistados:

- Jabones
- Pasta de dientes
- Mantequilla



-
- Quesos
 - Mermeladas
 - Mayonesa
 - Yogurt
 - Lava
 - Magma
 - Sangre
 - Saliva
 - Mucosa
 - Lodo
 - Cemento



Capítulo III. Definición de Reología

En este apartado se presentan los hechos más relevantes que dieron pie al nacimiento de una nueva disciplina, así como conocer la definición actual de la misma.

En octubre de 1924 se celebró un simposio sobre la plasticidad (el cual realmente fue citado para estudiar la viscosidad). El gran interés manifestado por el tema condujo a la celebración de un tercer simposio, en el que se decidió formar una organización permanente para el desarrollo de la nueva disciplina. Comienza con un comité que se reunió en abril de 1929 en Columbus, Ohio, este estableció el alcance preliminar de la Sociedad de Reología. El nombre "reología" fue propuesto para describir "el estudio del flujo y la deformación de todas las formas de la materia" por E.C. Bingham y M. Reiner [4].

En las primeras reuniones que se llevaron a cabo como Sociedad de Reología, se caracterizaron las propiedades y el comportamiento de diferentes materiales como asfalto, pinturas, lubricantes, plásticos y caucho, lo que da una idea del alcance de la ciencia y también las numerosas disciplinas científicas que pueden estar involucradas.

La definición de reología que fue asignada en las primeras reuniones permitiría estudiar el comportamiento de toda la materia, incluidos los extremos clásicos de los sólidos elásticos de Hooke y los líquidos viscosos de Newton. Sin embargo, estos extremos clásicos se consideran generalmente fuera del ámbito de la reología. Así, por ejemplo, la mecánica de fluidos newtoniana basada en las ecuaciones de Navier-Stokes no se considera una rama de la reología, como tampoco lo es la teoría clásica



de la elasticidad. Por lo tanto, el principal objeto de estudio son los materiales que se encuentran entre estos extremos clásicos, como los hilos de seda de Weber y la teoría de fluidos de Maxwell

Un suceso importante relativo a reología: James Clerk Maxwell ya en esa época era considerado como un científico muy importante, pero su ecuación viscoelástica la propuso para gases, lo cual es un error muy grave, pues no hay gases viscoelásticos. Sin embargo las ecuaciones funcionan si se aplica a fluidos viscoelásticos [10].

Volviendo a la perspectiva histórica, observamos que en las primeras décadas del siglo XX hubo muy poco interés en el estudio reológico y prácticamente, hay que esperar hasta la segunda guerra mundial para que la reología surja como una disciplina a considerar. Se descubrió que los materiales utilizados en los lanzallamas eran viscoelásticos y este hecho generó su cuota de investigación durante la Guerra, desde entonces, el interés por el tema se ha multiplicado, con la aparición de las industrias de fibras sintéticas y de transformación de plásticos, así como la aparición de detergentes líquidos, aceites, pinturas antigoteo y adhesivos de contacto. La industria farmacéutica y alimentaria ha experimentado un importante desarrollo y la investigación médica moderna incluye un importante componente de biorreología. La fabricación de materiales por vía biotecnológica requiere de bases sólidas en reología. Todos estos desarrollos y materiales ayudan a ilustrar la importancia sustancial de la reología para la vida en la segunda mitad del siglo XX [10].



Viscosidad

Una de las características importantes de los fluidos es la viscosidad, la cual es la medida de la resistencia que presenta un fluido para moverse. Debido al movimiento que ocurre en capas, éstos presentan fricción entre las diversas porciones y cuando el movimiento es lento da origen a lo que se denomina régimen laminar y se refiere a un movimiento ordenado de las partículas del fluido. Estas capas se deslizan unas sobre otras presentando una resistencia, por lo tanto, la viscosidad es la propiedad del fluido a resistir los esfuerzos cortantes, es importante mencionar que la viscosidad es dependiente de la temperatura y presión. Por ejemplo, si tenemos agua y miel a la misma temperatura y estuvieran sometidas al mismo esfuerzo, el agua se deformaría más fácilmente que la miel. Con lo anterior podemos imaginar que el agua y el aire tendrían viscosidades bajas, mientras que la melaza y el petróleo poseerían mayor viscosidad si se encontraran todos los fluidos a la misma temperatura [5].

La viscosidad se utiliza como un indicador cuantitativo de calidad en la fabricación de aceites, en la industria de la petroquímica:

a.- Industria de los alimentos; las salsas, los yogurts, gelatinas, miel

b.- Industria farmacéutica; las gotas lubricantes, las cremas protectores UV, los jarabes, suspensiones orales;

c.- Industria textil; la producción de cubrebocas, guantes de látex, impermeables, entre otros.



Además el control de la viscosidad es muy importante en la producción de pintura, a nivel industrial, existe una gran diversidad de equipos con diferentes diseños que se utilizan para medir viscosidad. Los reómetros rotacionales modernos, utilizados para medir la viscoelasticidad de materiales, se pueden clasificar en dos grupos:

- Control de deformación. En estos, la muestra se coloca entre dos placas, una de las cuales gira a una velocidad constante y se mide la fuerza de torsión (esfuerzo) producida en la otra placa. En este caso, la velocidad de rotación es la variable independiente y el torque (esfuerzo) es la variable dependiente.
- Control de esfuerzo. Se aplica cierto esfuerzo (torque) a una de las placas y se mide el desplazamiento o la velocidad de rotación de la misma placa.

Además, el uso de Materiales de Referencia Certificados en viscosidad apoya la equidad en las transacciones comerciales de los productos cuya calidad depende de la viscosidad, no solamente para el mercado nacional, sino también para los productos que México exporta e importa, tales como aceites comestibles, pinturas, recubrimientos, derivados del petróleo, y polímeros, entre otros. Las transacciones comerciales serán más confiables en cuanto a la cantidad de material vendido o comprado, cuando los productores y laboratorios realicen mediciones de viscosidad con equipos calibrados con líquidos de referencia certificados por el CENAM [11].

Viscosidad de una solución de gotas oftálmicas.

La falta de lubricación de la superficie ocular provoca resequedad en los ojos, el cual es un problema común en las personas. En esta condición, se produce una irritación por inflamación ocular de los tejidos del ojo. Existen emulsiones acuosas, que sirven para lubricar el ojo y evitar dicha resequedad [12].



Cuando el ojo está abierto, el fluido lagrimal se encuentra en reposo. Cuando se inicia el parpadeo se aplican esfuerzos cortantes. Los valores de la velocidad de corte de abrir y cerrar los párpados varían entre 4000 y 10000 s⁻¹ [13]. Determinar la viscosidad de las gotas oftálmicas a alta velocidad de corte es muy importante. De este modo, se puede deducir que una formulación óptima debería poseer alta viscosidad en reposo para evitar su derrame (sin que esto afecte a la calidad de visión), pero suficientemente fluida durante el parpadeo para lograr una adecuada lubricación sin desgastar la superficie, viscosidad asociada a la visión borrosa. Este tipo de comportamiento es característico de soluciones que presentan flujos pseudoplásticos [12].

Viscosidad de los aceites de autos

La industria automotriz trabaja con muchos materiales, cuyas propiedades reológicas tienen importancia ya que se logra calidad del producto. Esto inicia desde la producción de la carrocería en donde se usan materiales como aceites, grasas y sellantes. Para los parabrisas, los sellos de las puertas, el montaje y los neumáticos, entre otros, se necesitan diferentes tipos de polímeros. Los aceites, las grasas y los combustibles mantienen en funcionamiento el motor y los recubrimientos superiores se usan para proteger el acabado del auto de rayones y otros daños. Conocer el comportamiento reológico de estos materiales es necesario para ahorrar en costos y tiempos de producción.

El propósito básico de un lubricante es reducir la fricción y el desgaste entre dos superficies en movimiento al formar una película fluida que soporta la carga. Sin



embargo, un lubricante en un motor de automóvil debe cumplir con mantener la estabilidad a temperaturas elevadas, evitar la oxidación y corrosión de las piezas metálicas. Por lo tanto, es necesario agregar varios aditivos, como modificadores de viscosidad, agentes anti desgaste, aditivos de presión extrema, antioxidantes y demás, al aceite base.

Los modificadores de viscosidad (estructuras poliméricas) se agregan al lubricante para minimizar los cambios de viscosidad a las diferentes temperaturas. El lubricante ideal, debe formar una película que separe las superficies de contacto que lubrica, por lo tanto debe ser lo suficientemente viscoso. Debido a las mejoras en la eficiencia (cambios en la formulación), esta película se vuelve delgada y existe la posibilidad de que no pueda mantener las superficies separadas en condiciones inesperadas, como por ejemplo en un aumento repentino de la presión o una situación de arranque/parada. Así, se agregan otros aditivos como agentes anti desgaste y aditivos de presión extrema para facilitar la formación de películas de superficie de sacrificio en las piezas metálicas móviles [14].



Ley de viscosidad de Newton.

El enunciado de la ley de la viscosidad de Newton se puede explicar considerando una situación física concreta que definirá de una mejor manera la "tasa de deformación angular" e intuir físicamente cómo se relaciona con las otras dos magnitudes (esfuerzo de corte y viscosidad) de este enunciado [5].

Con el fin de explicar mejor las cantidades físicas involucradas en la ley de Newton se muestra el ejemplo de flujo entre dos placas horizontales con una en movimiento. Consideramos el flujo entre dos placas planas horizontales paralelas separadas una distancia h , generalmente esta distancia es del orden de 1 mm o menos, como se representa en la Figura 9. Si aplicamos una fuerza tangencial F a la placa superior suficiente para moverla a velocidad constante V en la dirección x , y estudiamos el movimiento resultante del fluido entre las placas.

En otras palabras, al moverse la placa superior las capas de fluido sufren un desplazamiento, mientras que las capas del fluido en contacto con la placa inferior no sufren desplazamiento alguno debido a que esta está fija. Este desplazamiento genera un perfil de velocidad, desde la velocidad cero (placa inferior) hasta alcanzar la velocidad de la placa superior.

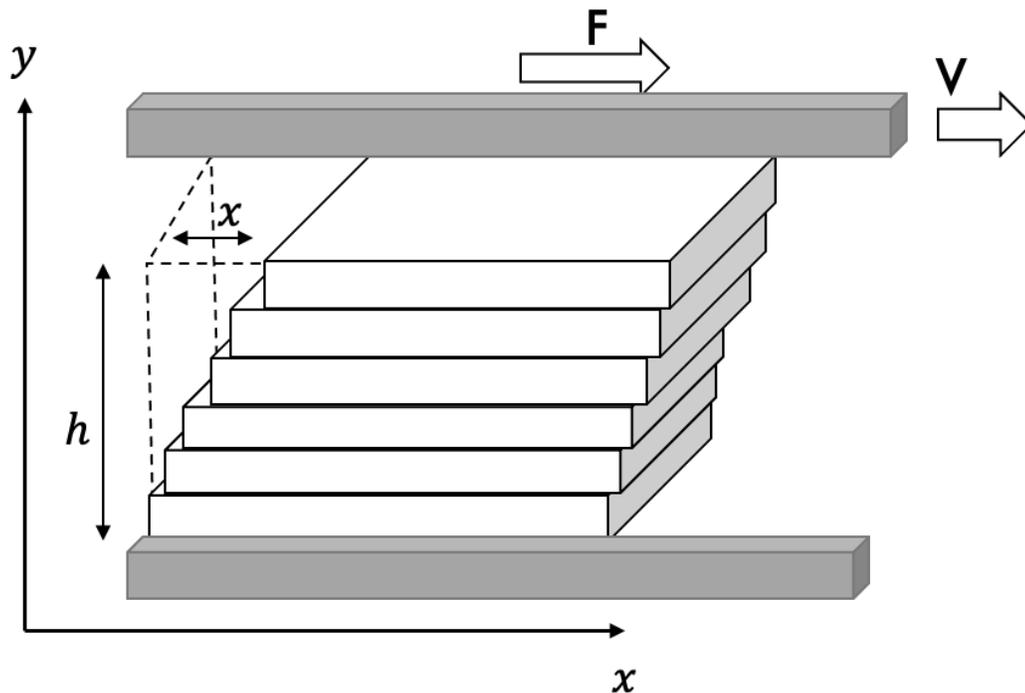


Figura 9. Representación del movimiento de un fluido entre placas paralelas horizontales en presencia de flujo F

Fuente: Elaboración propia/ Basado en la referencia [5]

Considerando la pregunta obvia "¿Por qué la velocidad es cero en la placa inferior y la velocidad de la placa superior es constante, es decir, diferente de cero?" Esto es una consecuencia de lo que se llama la condición de no deslizamiento para los fluidos viscosos: es una observación experimental los fluidos viscosos siempre toman la velocidad (en dirección tangencial) de las superficies a las que son adyacentes. Si consideramos la naturaleza detallada de las superficies reales en contraste con las superficies ideales perfectamente lisas. También observamos que todo este argumento se basa en la capacidad de definir las partículas de fluido en todos los puntos de una región de la superficie sólida de forma continua [5].



Los experimentos demuestran que la fuerza necesaria para producir el movimiento de la placa superior con velocidad constante V es proporcional al área de esta placa; además, es inversamente proporcional a la separación entre las placas, h . Así:

$$F = \mu \frac{AV}{h} \quad (1)$$

Siendo μ la constante de proporcionalidad. En particular, el movimiento de la placa superior actúa, a través de la viscosidad, para intentar "arrastrar" a la placa inferior; pero este efecto (de arrastre) disminuye con la distancia h entre las placas.

Ahora recordemos que el esfuerzo de corte (promedio) se define por:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Donde:

F : Fuerza [=] N

A : Área [=] m^2

La ley de viscosidad de Newton se puede escribir como:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

μ : La constante de proporcionalidad, denominada viscosidad y dependiendo de este valor, el esfuerzo cortante será mayor o menor.

Los parámetros dv y dy se consideran un diferencial del espesor de la capa laminar.



Convirtiéndose en:

$$\tau = \mu \frac{V}{h} \quad (4)$$

Se observa que probablemente un enunciado mejor de la ley de viscosidad de Newton sería "el esfuerzo de corte es proporcional a la velocidad de deformación angular, siendo la viscosidad la constante de proporcionalidad."

En este punto es útil considerar las dimensiones y unidades de la viscosidad. Para ello, de la ley de Newton se obtiene:

$$\mu = \frac{Fh}{AV} \quad (5)$$

Donde:

F : Fuerza cortante [=] *dyn*

h : Espesor de la película [=] *cm*

A : Área de la película lubricante sometida al esfuerzo [=] *cm*²

V : Velocidad lineal [=] $\frac{cm}{s}$

La unidad resultante se conoce como Poise, en honor al doctor Poiseuille, físico francés quién experimentó con flujos en tubos capilares. Es decir:

$$1 \text{ Poise} = 1 \frac{\text{dina}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2}$$

La viscosidad se manifiesta a escala molecular, debido a dos principales efectos físicos: la cohesión intermolecular y la transferencia de cantidad de movimiento.



Podríamos esperar que la cohesión sea dominante en los líquidos, ya que sus moléculas están *empaquetadas*, mientras que la transferencia de momento será más importante en los gases ya que se mueven rápido sus moléculas y están apartadas unas de otras [5]. Estas observaciones nos sirven para explicar el hecho de que la viscosidad de un líquido disminuye al aumentar la temperatura, mientras que la de un gas aumenta al incrementar la temperatura. Al aumentar la temperatura en líquidos, sabemos que aumenta la energía cinética, las fuerzas disponibles para aumentar las interacciones polares son mayores que a temperaturas bajas y el orden local se reduce, también se reduce la “fricción interna”, la consecuencia es que el líquido será menos viscoso. En el caso de los gases es más fácil analizar un sistema cerrado, dicho en otras palabras, con un volumen fijo, las colisiones moleculares no son frecuentes. Sin embargo, al aumentar la temperatura, se produce un aumento de la energía y del momento; es decir, que aumenta la probabilidad de colisión con otra molécula. Por lo tanto, el número de colisiones como el momento intercambiado por colisión aumentan con la temperatura en un gas y estos factores dan lugar a un aumento de la viscosidad [5].

Otra de las propiedades que envuelve el concepto de viscosidad es la estructura; los líquidos simples suelen ser newtonianos, aunque son pocas las suspensiones o disoluciones macromoleculares que presentan este comportamiento, en términos generales se define que las disoluciones ofrecen un flujo newtoniano si la cadena macromolecular tiene menos de 1000 átomos. Sin embargo, también influye la concentración ya que, a concentraciones bajas, pueden ofrecer comportamiento



newtoniano, incluso las disoluciones macromoleculares. En conclusión, para obtener comportamiento newtoniano, las suspensiones macromoleculares deben poseer una estructura discontinua [7].

La linealidad del esfuerzo vs rapidez de deformación se mantiene dentro del llamado régimen laminar. En la Figura 10 se representa τ en función de $\dot{\gamma}$ para un flujo newtoniano en régimen laminar y otro newtoniano en régimen y otro turbulento [7].

Donde:

$\dot{\gamma}$: Velocidad de corte [=] $\frac{1}{seg}$

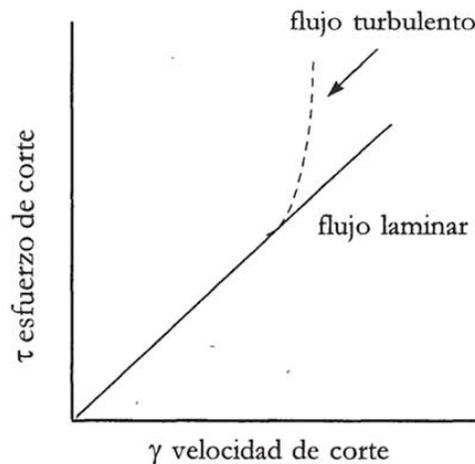


Figura 10. Representación del esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte, con flujo laminar y turbulento

Fuente: [7].

El primer investigador que estudió la turbulencia fue Osborne Reynolds, el describe que cuando la velocidad de un fluido que se mueve en un tubo sobrepasa un determinado valor crítico (que depende del fluido y del diámetro del tubo) la naturaleza del flujo se hace muy compleja:

- En la capa cerca de las paredes del tubo, capa límite, el flujo sigue siendo laminar, de hecho la velocidad del flujo en la capa límite, (en las paredes), es cero y aumenta hacia el centro del tubo.
- Más allá de la capa límite, el movimiento es muy irregular, originándose corrientes circulares locales aleatorias denominadas vórtices que producen un aumento de la resistencia al movimiento. En estas circunstancias el régimen de flujo se llama turbulento [15].

El número que indica el comienzo de la turbulencia ha sido denominado número crítico de Reynolds Re , dado por:



$$Re = \frac{2\rho Q}{\pi r \eta} \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad del líquido Q es el flujo volumétrico (volumen de líquido que sale por unidad de tiempo), r es el radio de la tubería y η es el coeficiente de viscosidad. El número Re es adimensional.

Los valores de Re crítico son diferentes para un flujo en tubería y en placas paralelas, si el líquido es newtoniano, el régimen laminar ocurre para $0 < Re < 2300$ en el caso de tuberías. Las características pseudoplásticas tienden a estabilizar el flujo, con lo que la turbulencia sólo se produce a valores de Re mayores a 2300. Las partículas alargadas, frecuentemente presentes en suspensiones, actúan como núcleos de turbulencia. En líquidos no newtonianos no se puede calcular Re , porque el coeficiente de viscosidad es variable, sin embargo se usa aunque sea un valor representativo. [7].

Viscosidad extensional

El primero en estudiar la viscosidad extensional fue Trouton en 1906, el cual estudio la relación entre la viscosidad cortante y la viscosidad extensional (él la llamo coeficiente de tracción viscosa) y su intención era obtener la viscosidad de un fluido newtoniano incompresible [16].

Hasta mediados de 1960 el tema se volvió relevante, ya que la reología estaba dominada por los flujos cortantes. En los últimos veinte años, la situación ha cambiado al constatar que el flujo extensional tiene una importancia significativa en muchas situaciones prácticas y que los líquidos elásticos no newtonianos presentan características muy diferentes a los líquidos newtonianos. En consecuencia, ahora se



dedica mucho esfuerzo a tratar de medir la viscosidad extensional de los líquidos no newtonianos, ya sean sistemas “rígidos” como los polímeros fundidos, o sistemas “móviles” como las soluciones poliméricas diluidas, suspensiones y emulsiones. Metzner, A.B. y Metzner, A.P. estudiaron los niveles de tensión en flujos extensionales de fluidos poliméricos. La observación general acerca de la facilidad para llevar a cabo trabajos teóricos sobre las características de flujo extensional de los modelos moleculares queda también ilustrada por el importante trabajo de Batchelor sobre suspensiones de partículas delgadas. Demostró que la viscosidad extensional para tales sistemas puede ser muy alta, dependiendo de la relación de las partículas [10].

La viscosidad extensional muestra un comportamiento muy diferente de la viscosidad de corte. Por ejemplo, un polímero elástico que puede disminuir su viscosidad corte gradualmente, pero incrementa drásticamente su viscosidad extensional conforme aumenta la rapidez de deformación, en la deformación extensional de tipo uniaxial ocurre en la extensión selectiva de un fluido. Tomando en cuenta algunas consideraciones teóricas se conoce la relación entre la viscosidad al corte y la viscosidad extensional, la cual es:

$$\eta_E(\dot{\epsilon})|_{\dot{\epsilon}=0} = 3\eta(\dot{\gamma})|_{\dot{\gamma}=0} \quad (7)$$

Esta relación es válida para todos los valores de $\dot{\epsilon}$ y $\dot{\gamma}$ solo en caso de fluidos newtonianos. Este resultado fue obtenido por Trouton en 1906. En honor a esto la relación entre la viscosidad extensional y la viscosidad cortante se define como la relación de Trouton [17].



$$T_r = \frac{\eta_E(\dot{\epsilon})}{\eta(\dot{\gamma})} \quad (8)$$

Viscoelasticidad

En reología este concepto es relevante porque describe el comportamiento de diversos materiales. Los efectos viscoelásticos son observables en fluidos no Newtonianos. En general este concepto hace referencia a la superposición de los efectos de disipación de energía (efectos viscosos) y de los efectos de almacenamiento de energía (efectos elásticos). [18]

Si se aplica un esfuerzo sobre un sólido elástico éste se deforma (Figura 11 a) hasta que la fuerza cesa y la deformación vuelve a su valor inicial. Por otra parte, si un esfuerzo es aplicado sobre un fluido viscoso (Figura 11 b) éste se deforma, pero no recupera nada de lo que se deforma. Un comportamiento intermedio es el comportamiento viscoelástico (Figura 11 c), en el que el cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de la deformación aplicada. [19]

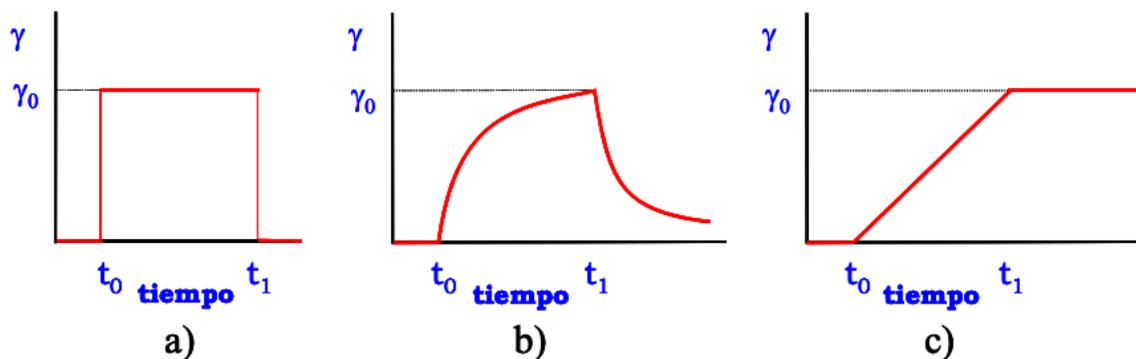


Figura 11. Tipos de comportamiento a) elástico b) viscoso y c) viscoelástico

Fuente: [19]

El comportamiento viscoelástico es destacado en situaciones de movimiento inconstante, esto es, cuando los esfuerzos o deformaciones están cambiando con el



tiempo. Por lo que la respuesta dinámica de los materiales viscoelásticos puede ser utilizada para obtener información de aspectos estructurales de un sistema a nivel molecular o predecir el comportamiento a una escala macroscópica [18].

Uno de los modelos que describe el comportamiento viscoelástico es el de Maxwell. A partir de este modelo se pueden obtener funciones que representen los módulos de almacenamiento y disipación (G' y G''), resultando las siguientes ecuaciones [18]:

$$G' = \eta_0 \frac{\lambda \omega^2}{1 + (\lambda \omega)^2} = G \frac{(\lambda \omega)^2}{1 + (\lambda \omega)^2} \quad (9)$$

$$G'' = \eta_0 \frac{\omega}{1 + (\lambda \omega)^2} = G \frac{\lambda \omega}{1 + (\lambda \omega)^2} \quad (10)$$

Donde:

G = Módulo de rigidez

G' = módulo de almacenamiento

G'' = módulo de pérdida

η_0 = viscosidad a bajas velocidades de corte

λ = tiempo de relajación de esfuerzos

ω = frecuencia de oscilación



Viscoelasticidad lineal

En cuanto a los materiales viscoelásticos, el comportamiento es algo parecido, para deformaciones muy bajas, casi cercanas al equilibrio existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación, encontrándose en la zona denominada como de "viscoelasticidad lineal". Para deformaciones mayores, dicha relación deja de ser lineal y se alcanza la denominada zona de "viscoelasticidad no lineal" [2].

En la viscoelasticidad lineal las funciones materiales de los módulos de almacenamiento, G' el cual indica la cantidad de energía que se almacena en el material en cada ciclo de deformación y de pérdida, G'' que es un indicativo de la cantidad de energía disipada durante cada ciclo de deformación. De esta manera, para un sólido perfectamente elástico, donde toda la energía se almacena y se recupera en cada ciclo, G' tendrá un valor de cero y el esfuerzo y la deformación estarán en fase ($\delta = 0$); no obstante, para un líquido viscoso, donde la energía se disipa en forma de calor, G'' tendrá un valor de cero el esfuerzo y la deformación tendrá una diferencia de 90° . Por lo tanto, para un material viscoelástico donde tanto la componente elástica como la viscosa están presentes, el ángulo de diferencia (δ) tendrá un valor intermedio entre 0° y 90° [18].

Para la mayoría de los materiales con pesos moleculares altos (por encima del peso molecular crítico PM_c , el cual se define como el peso molecular en donde se empiezan a observar interacciones entre cadenas) se han identificado cuatro zonas viscoelásticas: vítrea, transición, meseta o plástica, y terminal o de flujo (ver Figura 12). Donde, la zona terminal está representada a bajas frecuencias y tiene como

características generales pendientes de 1 para G'' y 2 para G' en escala logarítmica: la zona terminal sigue a la zona de meseta y empieza por un máximo en $G'(w)$ denominado $G''_{m\acute{a}x}$, y se presenta en una frecuencia w_m ; luego G'' pasa por un mínimo para volver a aumentar, en esta zona G' permanece relativamente constante y se denomina como módulo de meseta (G_N^0); en la zona de transición G'' vuelve a ser mayor que G' , y por último, en el inicio de la zona vítrea vuelven a cruzarse G' y G'' , siendo G'' menor que G' , la cual se vuelve casi constante [18].

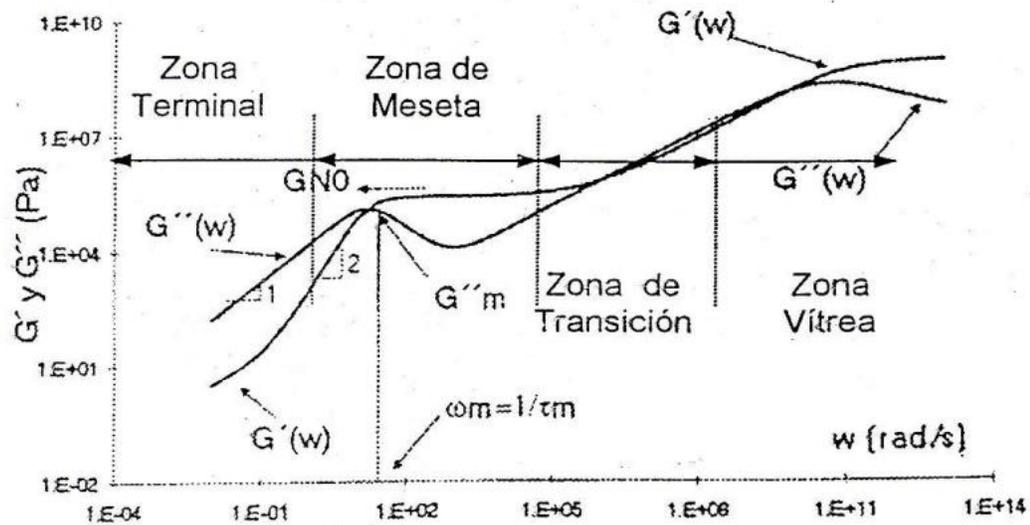


Figura 12. Curva maestra para los módulos de almacenamiento y pérdida en el dominio de la frecuencia

Fuente:[18]

Diferentes texturas y tipos de quesos

En la industria alimenticia se usa el queso como ingrediente en diferentes platillos, en estos, las propiedades de fundición del queso tienen gran importancia para las propiedades sensoriales de los mismos. Entre los platillos típicos en los que el



comportamiento de fusión (queso derretido) influye en las características se encuentran la pizza, la lasaña, el gratinado, diferentes salsas, tostadas, salchichas, hamburguesas con queso, palitos de queso, algunos alimentos horneados y productos a la parrilla.

El comportamiento reológico del queso puede medirse mediante una serie de pruebas. Estas pruebas son útiles para caracterizar el queso como material viscoelástico que presenta las propiedades de sólidos y líquidos ideales. Las características reológicas del queso están dadas por su macroestructura, microestructura, composición y entorno interno (por ejemplo, pH, temperatura). En el artículo "*Rheology, texture and meltability of different types of cheese*" se encontró que el tratamiento térmico del queso provocó variaciones en los parámetros reológicos medidos. Esto incluye los resultados relativos al módulo elástico inicial, la tensión y la deformación en el límite de la región viscoelástica lineal. Los quesos bajos en grasa se comportaron de forma muy diferente a los quesos con grasa. En cuanto a la deformación en el límite de la región viscoelástica lineal tras el calentamiento, parece que los quesos a base de leche alcanzan valores pH relativamente altos. [20]

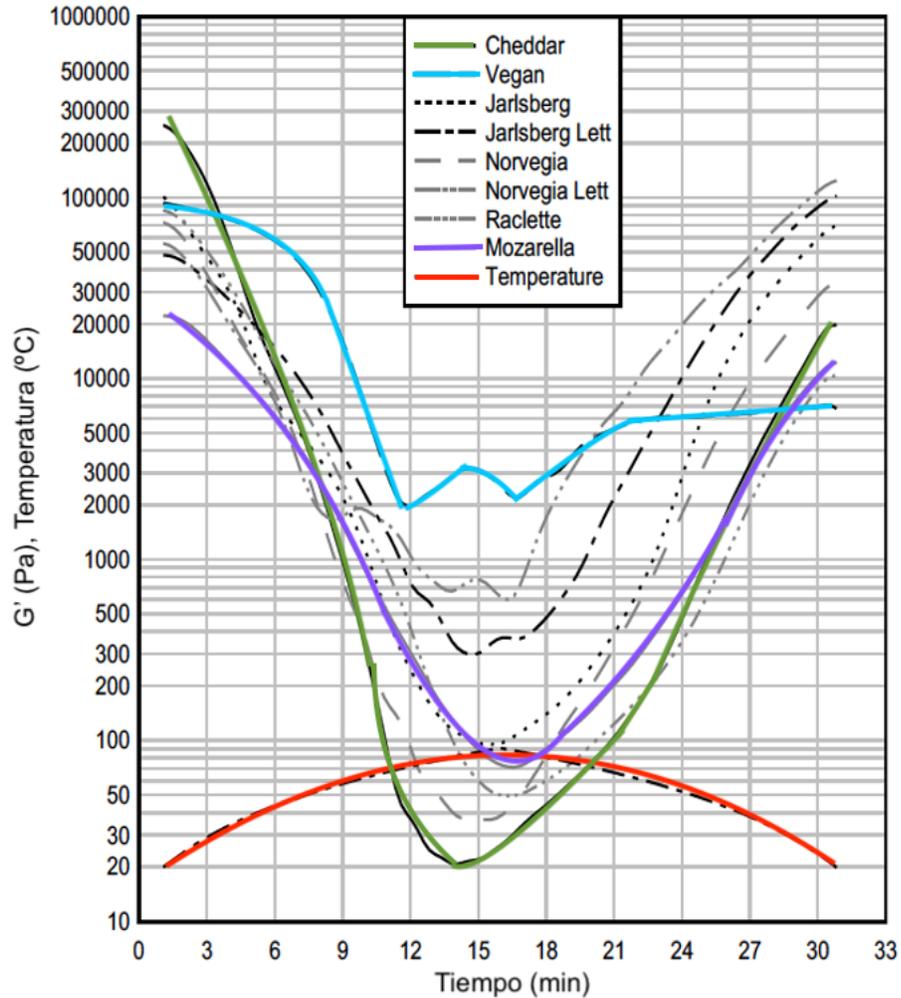


Figura 13. Variación de G' en función de la temperatura en el queso.

Fuente: [20]

En la Figura 13 se muestran variaciones de G' con la temperatura, respecto al tiempo. Los resultados demuestran que la rigidez se reduce en un factor de aproximadamente 100, cuando la temperatura aumenta de 20°C a 90°C (línea roja), se observa que el queso cheddar es el que obtiene la consistencia más líquida al aumentar su temperatura (línea verde), así mismo el queso mozzarella muestra el comportamiento



líquido al aumentar su temperatura (línea morada), mientras que el queso vegano (línea azul), no se derrite tan bien y por lo tanto no cumple con su objetivo de gratinado.

El pH durante la elaboración del queso antes del desuerado y el grado de disociación del calcio de la matriz de caseína, influye en las propiedades funcionales del queso. En algunos quesos, el pH cambiará durante el almacenamiento. Este cambio también puede influir en las propiedades funcionales del queso durante la fusión y la solidificación. Entre pH 5.35 y 5.0, estos quesos se vuelven más blandos y con mayor fundición. El Cheddar se midió con un pH de 5.12 y el Mozzarella con un pH de 6.08; el más bajo y el más alto, respectivamente. Los quesos con pH alto, Raclette y Mozzarella, alcanzaron la tensión más alta tras calentarse a 90°C. El queso sustitutivo vegano, con el pH más alto (7.5), no se puede comparar con los quesos auténticos, ya que el queso Go`Vegan no tiene grasa.



Mayonesa Hellmann's contra Heinz

En el estudio “*Hellmann's vs Heinz: Mayonnaise Fat Reduction Rheology*” se compararon los resultados de estrategias de sustitución de grasas de dos marcas muy conocidas, el objetivo es mostrar cómo la reología acelera la reformulación cuantificando las diferencias en la textura.

Existe una demanda para que los fabricantes de alimentos ofrezcan a los consumidores alternativas reducidas en grasa de sus productos favoritos. No es de extrañar que reducir la grasa de un producto compuesto principalmente de grasas no sea tarea fácil. Sobre todo teniendo en cuenta que la grasa influye en algunos de los principales atributos de calidad de la mayonesa: la manipulación (para untar), el sabor y la sensación en boca están influidos por la presencia de grasa. Para compensar estos cambios en la textura, los fabricantes de alimentos suelen añadir otros ingredientes, como almidones y gomas. Sin embargo, no todos los espesantes son iguales.

Grandes viscosidades de corte para explorar la sensación en boca.

En términos de propiedades reológicas, un viscosímetro suele ser el primer punto de referencia a la hora de evaluar la textura de los semisólidos. Las velocidades de corte experimentadas en la cavidad bucal oscilan, por ejemplo, entre 50 - 1000 s⁻¹.

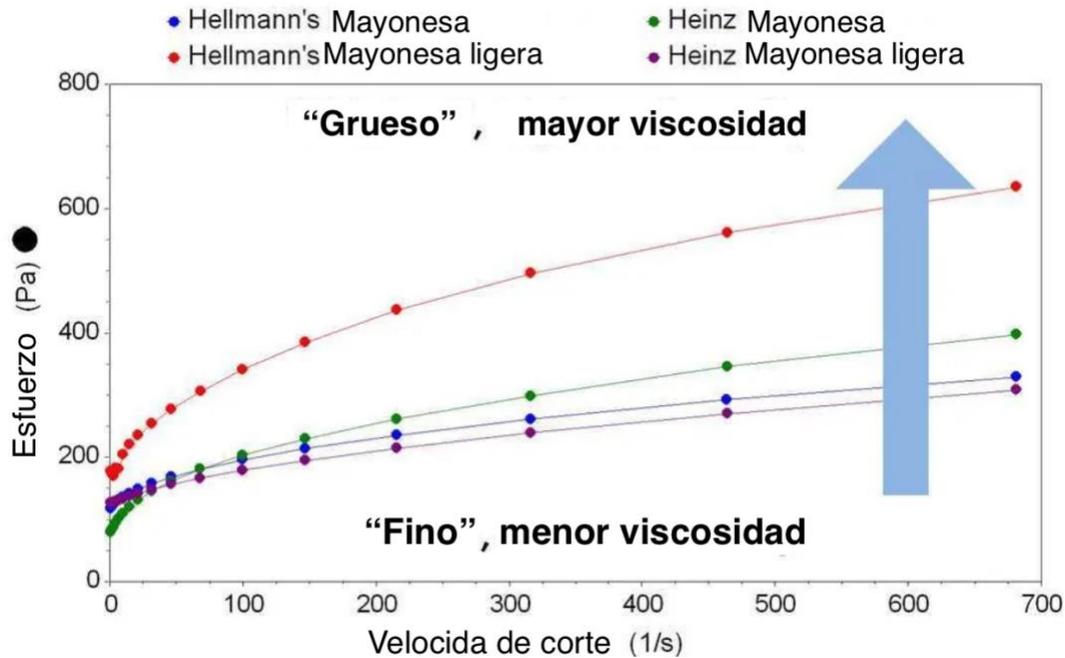


Figura 14. Esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte de mayonesa Hellmann's ligera, Hellmann's mayonesa, Heinz mayonesa y Heinz mayonesa ligera

Fuente: [21]

En la figura anterior se observa que las mayonesas comienzan con una tensión mayor a cero, lo que significa que se comportan como sólidos, hasta que el esfuerzo supera este valor denominado esfuerzo de cedencia. Nos gusta describir los materiales con esta característica como "líquidos estructurados", es decir, sólidos que pueden fluir.

La mayonesa Hellmann's ligera requiere hasta el doble de esfuerzo para fluir que la mayonesa Hellmann's en un rango de velocidades de corte. Esto puede afectar a una serie de propiedades, como la capacidad de procesamiento, la salida del envase y la percepción de la sensación en boca durante el consumo. Heinz ha conseguido una



mayor aproximación con su producto bajo en grasa, e incluso presenta similitudes con la mayonesa Hellmann's.

Pruebas dinámicas oscilatorias: cuantificación de la rigidez y la estructura.

Si sólo se observara la viscosidad, sería muy posible obtener una mayonesa parecida a la miel. Una observación clave entre las propiedades físicas de la miel y la mayonesa es que esta última mantiene su forma y tiene una estructura blanda y sólida. ¿Cómo medir la fuerza de la estructura sin destruirla por completo en el proceso?

En el mundo de la reología, la capacidad de un material para recuperar su forma original se considera una propiedad de los materiales sólidos. Se aplica un esfuerzo a un material, se mide el grado de deformación o tensión, se elimina el esfuerzo y se observa la capacidad del material para volver a su estado original. Esto es exactamente lo que ocurre con las pruebas dinámicas oscilatorias: empezamos por perturbar la muestra con esfuerzos suaves destinados a minimizar la alteración de la muestra, y aumentamos gradualmente el esfuerzo hasta que detectamos que el material se ha deformado permanentemente.

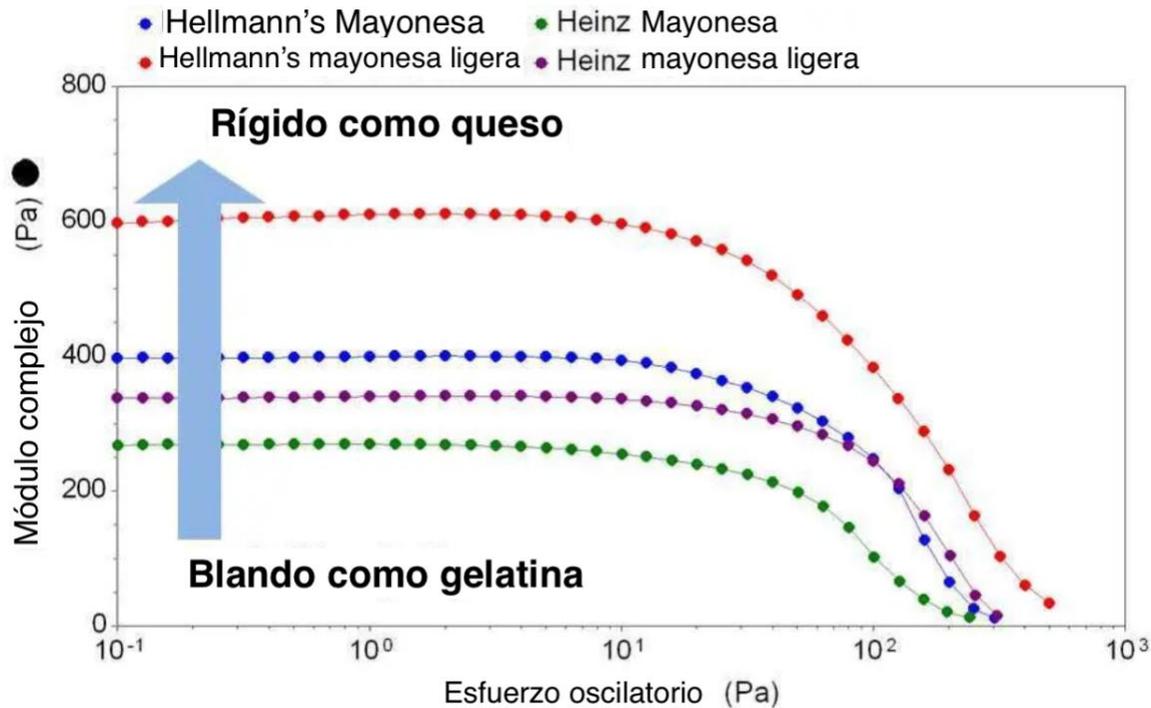


Figura 15. Esfuerzo oscilatorio vs el módulo complejo de los diferentes tipos de mayonesa.

Fuente: [21]

Los materiales con valores altos de módulo complejo suelen ser rígidos como el queso, mientras que los materiales con valores bajos suelen ser blandos y oscilantes como la gelatina.

El descenso en la curva a medida que aumenta el esfuerzo de oscilación indica que el material se deforma permanentemente. La mayonesa Hellmann's baja en grasa es la más rígida del conjunto. La mayonesa de Heinz es la más delicada, por lo que es probable que tenga menos definición estructural.



La reología ofrece una vía rápida para cuantificar los cambios clave en las propiedades de los materiales. La combinación de los datos de las pruebas anteriores con otras observaciones permitiría explorar y predecir el comportamiento, el aspecto e incluso las propiedades sensoriales de diversos productos.

Mediciones de viscosidad

Los cambios de forma de un cuerpo están asociados a la variación de los ángulos que definen la superficie de dicho cuerpo, asumiendo que originalmente son rectos, por lo tanto la deformación causada por la tensión de corte se expresa como un ángulo. Imaginemos al fluido como un grupo de láminas, en la deformación por corte, estas láminas se deslizan unas sobre otras con un desplazamiento de las mismas. Por ello las medidas de viscosidad se basan en cuatro tipos de deformación que se observan en la Figura 11.

En los casos B y D no presentan cambios de volumen, sin embargo se presenta la transmisión de movimiento. En todos los casos el gradiente de desplazamiento, es decir, la medida de deformación es $\tan \alpha$.

A continuación, se presenta una breve ejemplificación de los casos que se demuestran en la Figura 11. En el caso (A) se presenta como si fuera un grupo de cartas, al deslizarlas sobre una mesa, es decir como el ejemplo de placa móvil.

(B) se recrea la torsión de un equipo de taladro, o como si se mezclara en una olla.

(C) Se ilustra un empujón a una barra de pegamento sólido.

(D) Torsión de una pila de monedas.

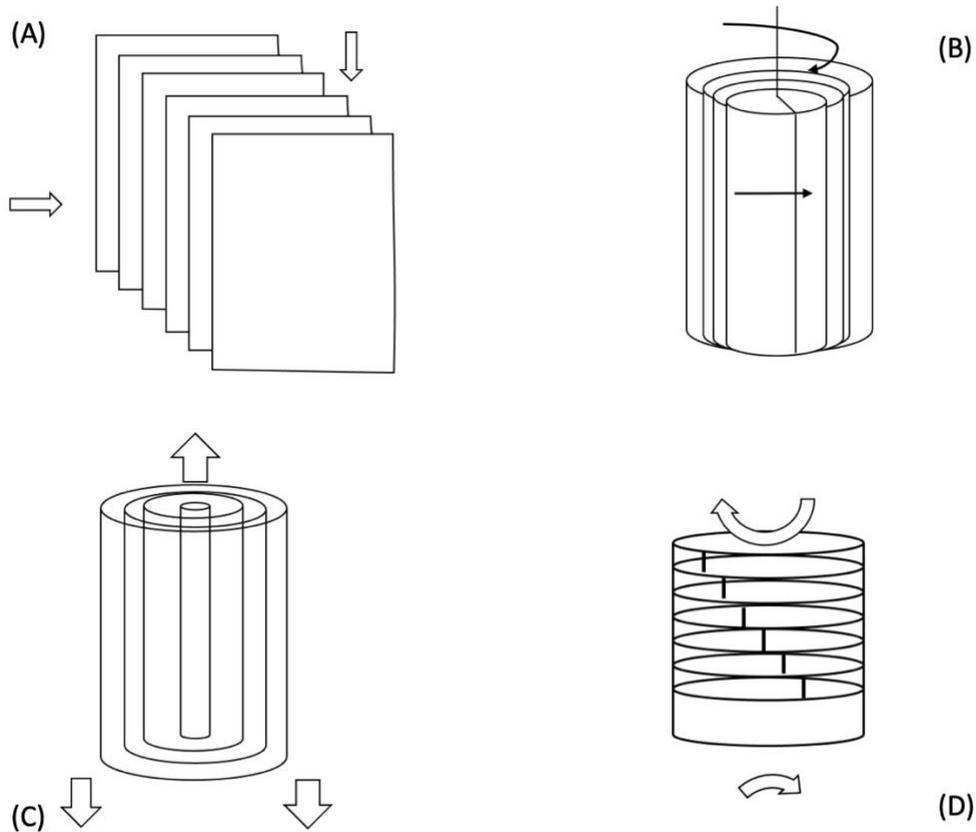


Figura 16. Visualización de cuatro tipos de corte

Fuente: Elaboración propia / Basado en la referencia [7]

Todos los métodos de deformación de la viscosidad de un líquido se basan en un solo concepto, que la fuerza motriz es igual al factor de la viscosidad multiplicado por un factor que exprese la geometría instrumental, este factor se calcula o determina por calibración, es decir, contra una sustancia patrón; y otro que exprese la velocidad del cambio de forma de la materia [7].

Existen métodos para determinar la viscosidad de un líquido, algunos se enlistan a continuación:



- Flujo del líquido a través de tubos

Este tipo de viscosímetro es muy utilizado para la medida de viscosidades de fluidos newtonianos. La fuerza impulsora es normalmente la presión hidrostática del líquido del que se va a medir la viscosidad.

- Viscosímetros rotacionales

Entre los diferentes tipos de viscosímetros de laboratorios, estos son idóneos para hacer una medición más exacta del nivel de viscosidad que tienen los fluidos, ya que se pueden controlar mediante un microprocesador.

- Viscosimetría vibracional

Este viscosímetro es idóneo para realizar mediciones dinámicas, permitiendo controlar los procesos en presencia de fenómenos transitorios o perturbaciones rápidas. Aunque el fluido vaya cambiando sus propiedades podemos medir a tiempo real ese cambio y todas sus fases.



Capítulo IV. Fenómenos reológicos

En este apartado se introducen algunos de los fenómenos no newtonianos que pueden presentar algunos fluidos complejos (desde el punto de vista reológico).

Esfuerzo de cedencia

Los fluidos con esfuerzo de cedencia son materiales que no fluirán a menos que un esfuerzo de corte haya sido excedido, este tipo de materiales se comportan como un sólido elástico. Esto se debe a la estructura interna del material que tiene que ser destruida para comenzar a fluir; esta estructura compleja se da por las interacciones físicas y químicas de los elementos que la componen formando redes tridimensionales [22].

Conocer el valor del esfuerzo de cedencia es importante para saber si el material es apropiado para el uso que se le quiera. Cuando el material se ha deformado más allá del límite elástico, quizás no pueda realizar correctamente la función a la que estaba destinada y debe ser sustituido. El esfuerzo de cedencia o punto de cedencia se define como el esfuerzo requerido para producir una pequeña deformación plástica. La definición más común de esta propiedad es la corrección del límite elástico que se determina mediante la intersección de la curva de esfuerzo-deformación y una línea paralela a la zona elástica de esta. Usualmente pertenece a una deformación del 0.2% - 0.1%.

Muchos metales fundidos, particularmente aceros de bajo carbono, muestran un tipo heterogéneo de transición entre la deformación elástica a la deformación plástica que



produce un punto de cedencia superior e inferior en la curva esfuerzo-deformación. [23].

Algunos modelos "teóricos ideales" de flujo con un límite elástico. Sin embargo, en la realidad, el valor del límite elástico dependerá del método de ensayo. Por lo tanto, el límite elástico medido debe denominarse "límite elástico aparente". Uno de los métodos más utilizados para determinar el límite elástico es, probablemente, el esfuerzo de corte continuo o la rampa de velocidad de corte, de bajo a alto esfuerzo o velocidad. El límite elástico suele determinarse ajustando las curvas de tensión/velocidad con los modelos de Bingham, Casson o Herschel-Bulkley. También se utiliza la extrapolación manual de la curva de tensión a la velocidad de corte cero para obtener una tensión de fluencia. En una rampa de esfuerzo de corte (velocidad), el límite elástico puede determinarse a partir del máximo de viscosidad transitoria en un gráfico logarítmico doble de viscosidad frente a esfuerzo (método de viscosidad máxima) [24].

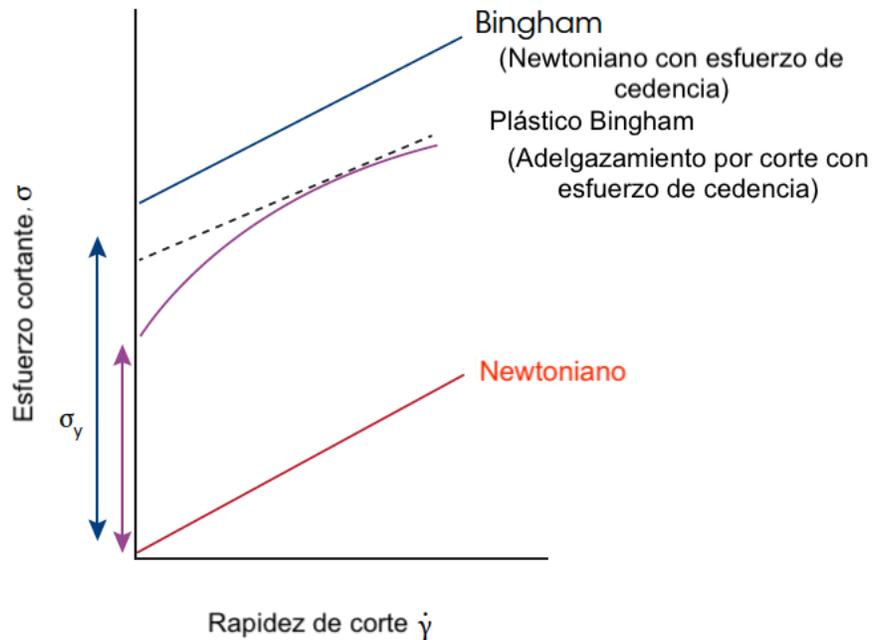


Figura 17. Comportamiento de la velocidad de corte vs esfuerzo cortante de algunos modelos reológicos con un límite elástico.

Fuente: [24]

Algunos ejemplos de este tipo de fluidos son emulsiones, suspensiones, geles, espumas, entre otros. Los fluidos con esfuerzo de cedencia tienen diferentes aplicaciones industriales:

- Industria de construcción: Un valor del esfuerzo de cedencia diferente de cero promueve que queden burbujas atrapadas en el concreto, esto debe evitarse para mantener la integridad del edificio [22].
- Industria petrolera: Es necesario conocer el esfuerzo de cedencia de los lodos de perforación para el diseño de equipo de bombeo [22].



- Industria del papel: Es importante conocer el esfuerzo de cedencia de las pulpas de fibras para el diseño del equipo utilizado para su procesamiento [22].
- Industria alimenticia: Ciertos productos alimenticios como la mayonesa, mostaza, cátsup, entre otros, tienen un esfuerzo de cedencia que inhibe la separación de las fases del alimento; además de permitir una adecuada dosificación del producto [22].
- Industria de cosméticos: Las cremas y geles además de una apariencia adecuada, deben tener cierta consistencia para no escurrir o transferir producto, además de fluir para su aplicación [22].

Esfuerzo de cedencia en espumas

La reología de las espumas es un tema difícil debido a lo complejo de su estructura y sus componentes (gas, líquido, tensioactivos, biopolímeros tensioactivos o partículas). Además, al igual que otros procesos de degradación de la espuma, la reología también es interdependiente: la fluencia lenta por debajo del esfuerzo de cedencia puede provocar el cambio de la estructura de la espuma y el engrosamiento [12]. Múltiples factores influyen en la reología de las espumas, entre ellos: las propiedades del líquido, las propiedades del gas, el volumen de la fase aérea, la fracción volumétrica del líquido, la viscosidad de la solución, la viscoelasticidad de la película interfacial, la distribución del tamaño de las burbujas y la forma de las burbujas. El tensoactivo o biopolímero adsorbido y el estado de la capa de adsorción también modifican las propiedades de la película líquida que separa las burbujas. La evaluación reológica se



basa en conceptos simples de tensión (fuerza por área) y deformación (deformación por longitud). La tensión (σ) es siempre una medida de fuerza por unidad de superficie y se expresa en unidades de pascales (Pa). Los módulos de almacenamiento G' nos dan información de la energía de deformación almacenada en la muestra, describiendo las propiedades de elasticidad [12].

Cuando la espuma fluye, las burbujas deben deslizarse unas sobre otras. Si el esfuerzo aumenta progresivamente, la estructura cede y se produce el flujo plástico. Durante la deformación, cuando las burbujas se tensan, se ejerce la presión osmótica y las burbujas acumulan energía superficial. De ahí que las espumas presenten un comportamiento viscoelástico lineal cuando están sometidas a pequeños esfuerzos cortantes, mientras que fluyen como líquidos viscosos cuando la tensión de corte aplicada es lo suficientemente grande como para provocar reordenamientos de las burbujas. Este comportamiento está relacionado con la estructura de la espuma a escala de la burbuja, por lo que tiene un esfuerzo de cedencia y pertenece a la categoría de materiales complejos que pueden denominarse "fluidos de Bingham", con una viscosidad inversamente proporcional a la velocidad de corte. En este caso, la escala de los módulos de corte y el esfuerzo de cedencia vienen determinados por la presión de Laplace de las burbujas [12].

Es evidente que los mecanismos de envejecimiento se producen simultáneamente (ver Figura 18). Todos estos procesos de envejecimiento afectaron las propiedades de elasticidad, ya que modificaron la distribución y el tamaño de las burbujas. El aumento de la fracción de gas debido al drenaje tiende a aumentar el límite elástico,

mientras que el engrosamiento de las burbujas conduce a una reducción del límite elástico. Por lo tanto, alteran considerablemente las propiedades macroscópicas (texturales y reológicas) de las espumas [12].

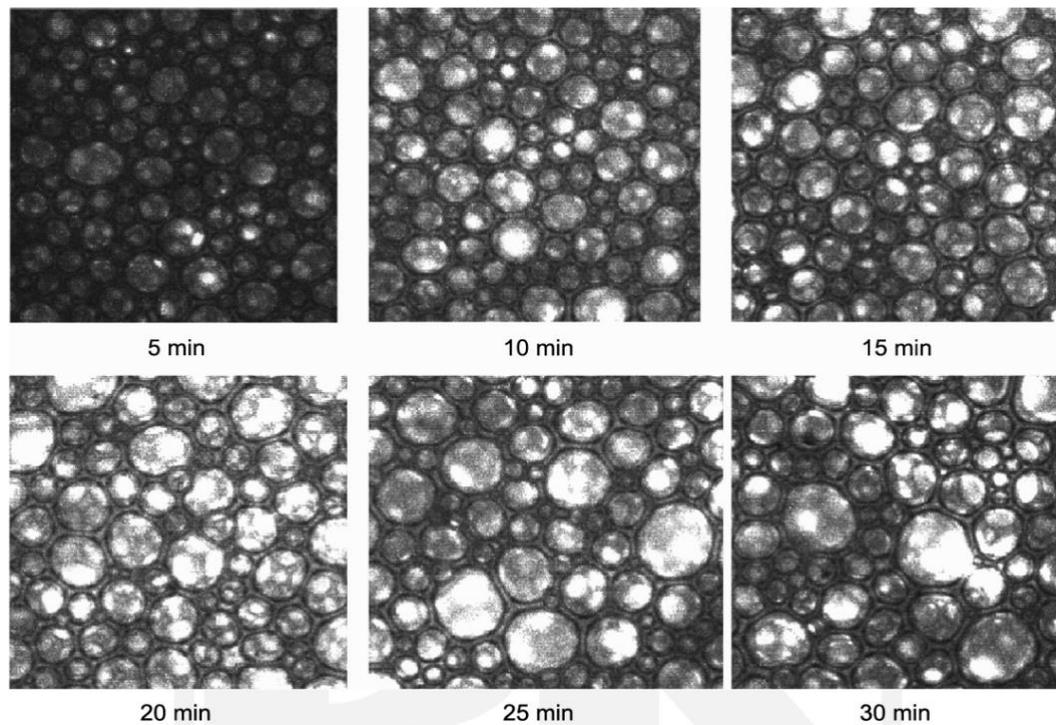


Figura 18. *Proceso de envejecimiento en la crema de afeitador comercial Nivea.*

Fuente: [12]

Tixotropía

Es la propiedad de algunos fluidos no newtonianos y pseudoplásticos que muestran un cambio de su viscosidad en el tiempo. Definimos un fluido tixotrópico como un fluido que tarda un tiempo finito en alcanzar una viscosidad de equilibrio cuando hay un cambio instantáneo en el ritmo de corte, además de que esta viscosidad disminuye. A los fluidos que exhiben la propiedad opuesta, en la que la agitación a lo largo del



tiempo provoca la solidificación, se les llama fluidos reopéxicos, estos últimos fluidos son mucho menos comunes de encontrar dentro del campo alimentario [4].

La tixotropía sugiere un proceso molecular para cambiar la consistencia. La mayoría de las sustancias que presentan tixotropía son de naturaleza coloidal (gelatinoso), con tendencia a formar geles. Esto se puede explicar como una consecuencia porque las moléculas se suman formando cadenas de moléculas [Ferguson Kemblowski, 1991] En tales sistemas, la interacción entre partículas es el resultado de las fuerzas de atracción de van der Waals por un lado, y de la repulsión electrostática y efectos estéricos por otra. La estabilidad del sistema depende de la existencia de una barrera de energía potencial que impide a las partículas aproximarse unas a otras de esta forma, los débiles enlaces físicos entre partículas dan lugar a la agregación [25].

Productos como los barnices, las lacas, las pinturas sintéticas y las pinturas al agua tradicionales no son productos tixotrópicos. Es decir que, una vez fabricados, mantienen sus características de fluidez en el tiempo. Por su parte, las pinturas para impermeabilización de paredes o suelos, los selladores para madera, las masillas para reparación de paredes o carrocerías y algunas siliconas, son ejemplo de productos que suelen ser muy tixotrópicos [26].

Ejemplos de alimentos con comportamiento tixotrópico son algunos zumos concentrados, mieles, gelatina, leche condensada o mostaza entre otros [26].



Fenómenos viscoelásticos

A continuación, se mencionan los fenómenos viscoelásticos más representativos en la disciplina, la gran mayoría son debidos a los esfuerzos normales los cuales se explican en el siguiente párrafo.

Esfuerzos normales.

El esfuerzo es la resistencia interna de un cuerpo, cuando se le aplica una fuerza externa que tiende a cambiar su forma o tamaño. Las fuerzas normales actúan en un ángulo recto respecto a un esfuerzo de corte aplicado.

Las fuerzas normales desempeñan un papel importante en varios procesos industriales, como la extrusión, la hilatura de fibras y en operaciones de mezclado por impulsores. El efecto Weissenberg conocido como escalada de varilla surgió del trabajo con geles de hidrocarburos saponificados para su uso como lanzallamas en la Segunda Guerra Mundial. Weissenberg (1947) fue el primero en atribuir este fenómeno a las primeras fuerzas normales y no es incongruente que este efecto lleve ahora su nombre.

La distribución de esfuerzos en un líquido viscoelástico durante su flujo cortante puede ser descrito formalmente definiendo el esfuerzo de corte τ_{21} y la primera N_1 y segunda N_2 (con unidades de Pa) como en la siguiente ecuación:

$$\tau_{21} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (9)$$

$$N_1 = \tau_{11} - \tau_{22} \quad (10)$$

$$N_2 = \tau_{22} - \tau_{33} \quad (11)$$

Donde los subíndices 1,2, y 3 denota la dirección de flujo, y direcciones normales al flujo, respectivamente; esto se puede observar en la Figura 19.

En estas ecuaciones η es la viscosidad cortante con unidades de Pa·s y $\dot{\gamma}$ es la rapidez de deformación con unidades s^{-1} . Los valores de N_1 y N_2 para fluidos newtonianos son cero y para fluidos poliméricos, N_1 es positiva y N_2 es negativa y más pequeña que N_1 . Un ejemplo de respuesta visible a un valor N_1 positivo, aparece cuando el fluido asciende por una varilla, este fenómeno es conocido como el efecto Weissenberg, más adelante se detalla dicho efecto [27].

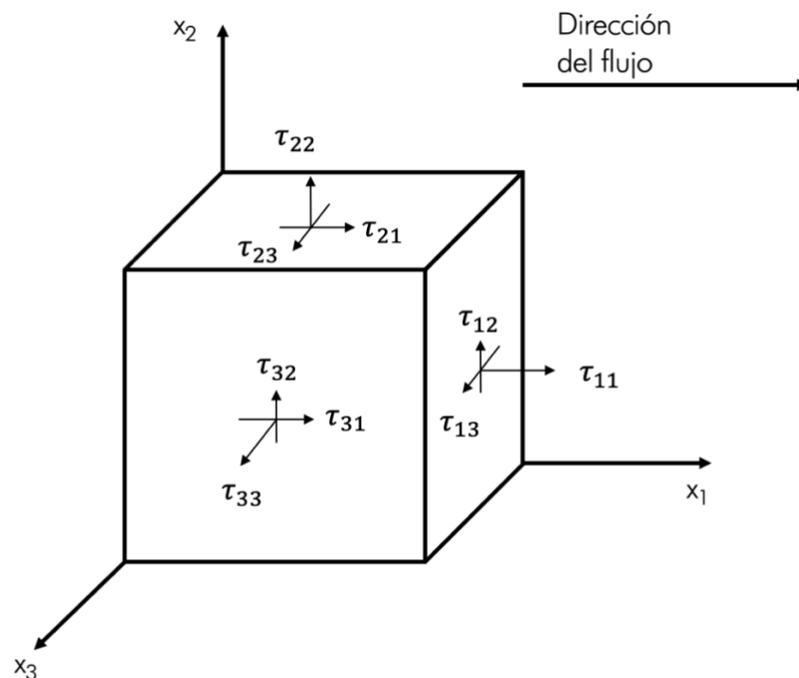


Figura 19. Componentes del tensor de esfuerzos con dirección de flujo

Fuente: Elaboración propia/ Basado en la referencia [27]



Desde un punto de vista físico, la generación de componentes de esfuerzos normales es desigual y lo que resulta en valores distintos de cero, surge del hecho de que en algún proceso de flujo la microestructura del líquido se vuelve anisótropo, es decir, que presenta características diferentes según la dirección del flujo.

En un sistema polimérico diluido, las moléculas de la cadena, que se encuentran en reposo ocupan un volumen de forma esférica, bajo un campo de flujo estos se deforman a una forma elipsoidal. En la Figura 20 se muestra la envoltura molecular en reposo, antes y durante la deformación bajo el efecto de flujo. Las gotas de una emulsión cambian de forma similar. Las unidades estructurales esféricas se deforman en elipsoides las cuales tienen sus ejes principales inclinados hacia la dirección del flujo. Por lo tanto, la fuerza de restauración es mayor en esta dirección que en las dos direcciones ortogonales. Las fuerzas de restauración dan lugar a los componentes de la tensión normal. Desde este punto de vista se aprecia por qué se observa que la mayor de las tres componentes de la tensión normal es siempre la componente en la dirección del flujo. Como los fluidos newtonianos son simples y casi siempre constan de moléculas pequeñas, no pueden formar madejas, es decir, no pueden ejercer esta fuerza, lo que implica que para los fluidos newtonianos $N_1 = 0$ [10].

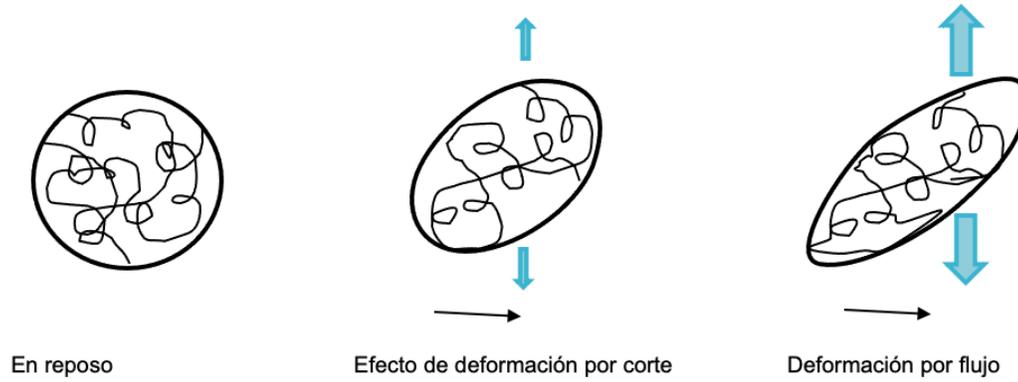


Figura 20. Estructura polimérica antes, durante la deformación por corte y durante la deformación por flujo

Fuente: Elaboración propia

Efecto de Weissenberg.

El efecto de escalada de la varilla de Weissenberg, es una manifestación de los esfuerzos normales y aparece alrededor del eje de transmisión. Las fuerzas centrípetas debidas a la elasticidad del fluido se oponen y los efectos centrífugos a bajas velocidades reducen el consumo de energía. En el punto de transición, las fuerzas elásticas se vuelven repentinamente dominantes y se desarrolla un flujo hacia el interior con un fuerte vórtice central. Es decir, que a bajas velocidades en vez de acumular el fluido en las paredes, se acumula en el agitador y no solamente eso, sino que escala por ella.

En la Figura 21 se encuentra un ejemplo del efecto Weissenberg [14].



Figura 21. Ejemplo del efecto Weissenberg

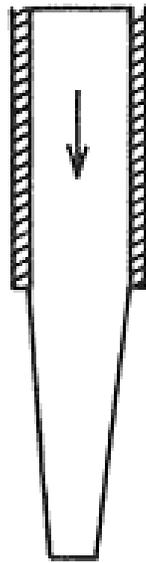
Fuente: Elaboración propia



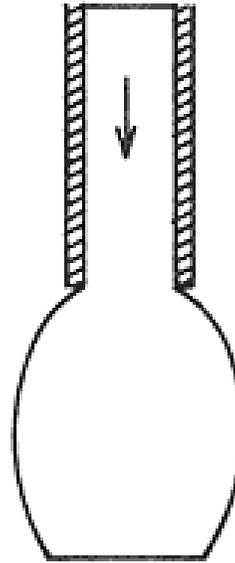
Efecto de ensanchamiento a la salida de una boquilla

Otro efecto de los esfuerzos normales es el sorprendente comportamiento que exhibe un fluido polimérico al salir de un orificio. . En el caso de fluidos newtonianos, el flujo se contrae ligeramente, pero un líquido polimérico puede “hincharse”. Un ejemplo sencillo lo podemos observar al oprimir un tubo de pasta dental e incluso algunos shampoos. En la Figura 22 se encuentra un ejemplo del efecto [15].

Este efecto se presenta en fluidos elásticos, es la acumulación de flujo en las paredes de la tubería, el ensanchamiento es debido a la caída de presión, es decir, que el fluido está sometido a una presión y a una sección del contenedor de mayor volumen que el que ocupa en la boquilla y al momento de atravesar el canal intenta recuperar la forma previa al encontrarse en este punto a condiciones de presión más bajas y con mayor volumen, este efecto es causado por los efectos elásticos, pues al salir por la boquilla, la presión del fluido disminuye. En otras palabras, es la manifestación de las tensiones que se han acumulado en el material, a medida que el material sale al ambiente las fuerzas se relajan.



Fluido Newtoniano



Fluido Polimérico



Figura 22. Ejemplo del efecto de hinchamiento

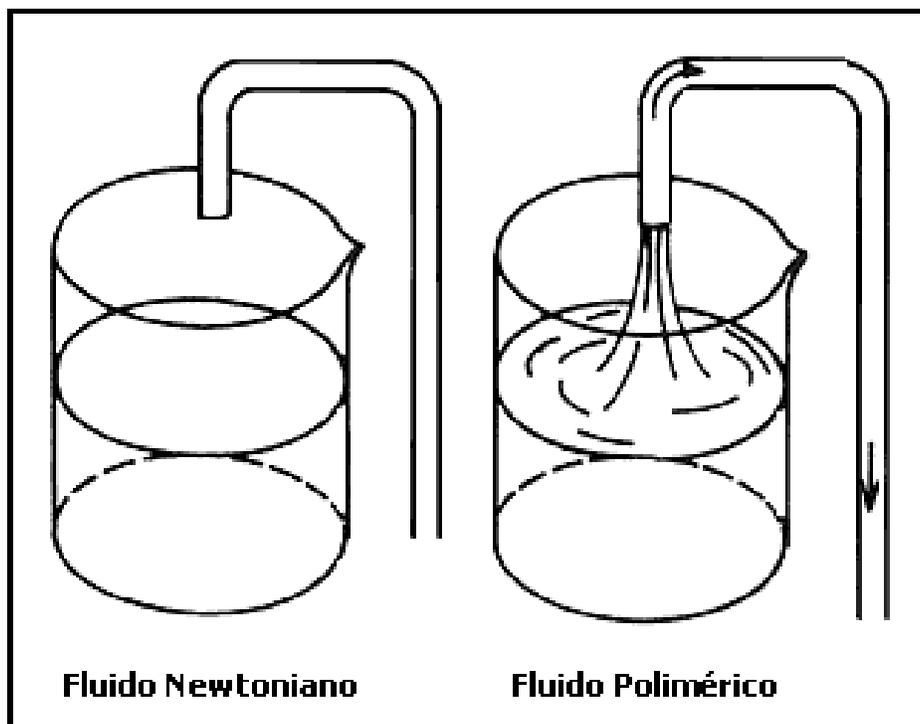
Fuente: [28]. / Elaboración propia



Efecto sifón

Las fuerzas normales son las causantes del efecto sifón; se conoce porque lo practicamos con líquidos ordinarios, al beberlo 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 tubo [15].

Como ejemplo se observa en la Figura 23 se llena un recipiente en contacto con el fluido no newtoniano, al momento de parar el contacto con el flujo permanece conectado en forma de sifón durante un tiempo.



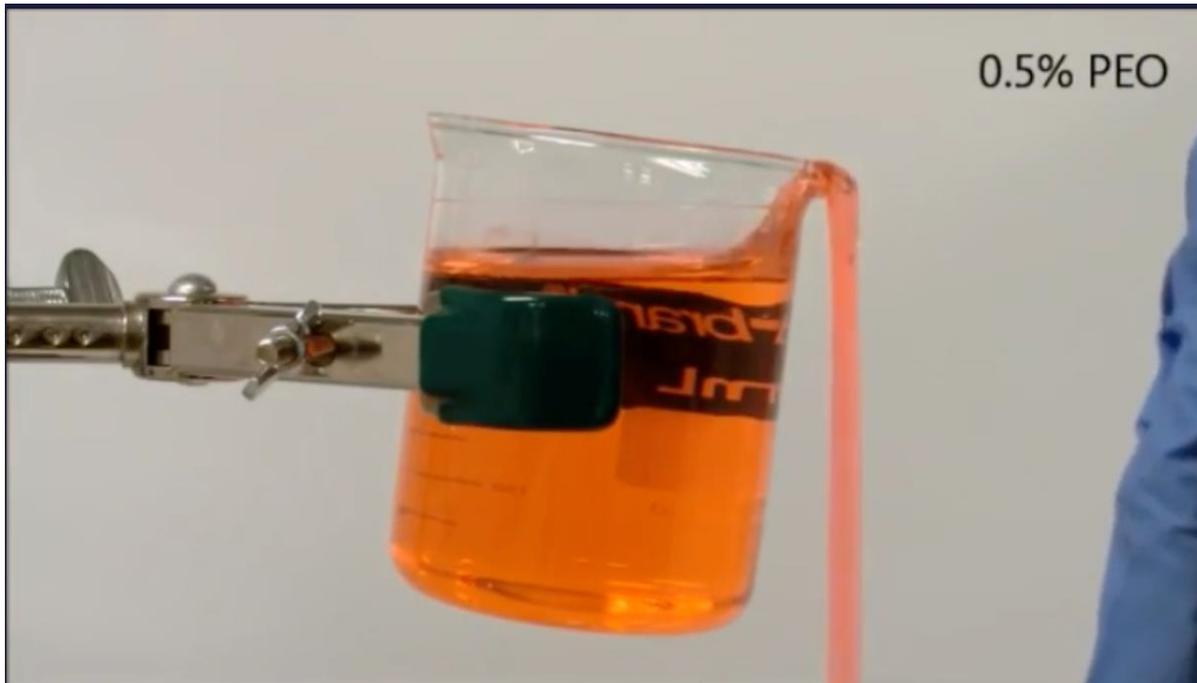


Figura 23. Ejemplo del efecto Sifón

Fuente:[28]./[29]



Capítulo V. Curiosidades de la reología y algo más

En este apartado retomo datos curiosos que si bien se perciben desde un enfoque de la reología moderna, ilustran los ejemplos de los fenómenos reológicos previamente mencionados y que aunque no sean casos de estudios rigurosos son interesantes.

Reología de los gatos

¿Los gatos pueden ser un fluido? Uno de los objetivos de la reología es caracterizar los estados de la materia con respecto al tiempo. Históricamente, la distinción popular entre los estados de la materia se basa en las diferencias cualitativas de las propiedades de la materia, es decir, el estado sólido mantiene un volumen y forma constantes, mientras que el estado líquido mantiene un volumen constante, sin embargo, éste se adapta a la forma del recipiente. En el artículo “*On the rheology of cats*” se pone a prueba esta premisa, utilizando herramientas de reología moderna.

Mantener o adaptar, son verbos que describen características de la materia respecto a una escala de tiempo. En reología, la escala temporal se consigue mediante el número de Deborah. Deborah es una figura prominente en la Biblia, conocida por su papel como jueza, profetiza y líder de Israel, ella declaró en el antiguo testamento que “*las montañas fluirían delante del Señor...*”, este parámetro fue introducido por el Dr. Reiner, uno de los fundadores de la reología [30].

$$De = \frac{\tau}{T} \quad (12)$$



Donde τ el cual llamaremos "tiempo de relajación" y T por lo general, es la duración del experimento. En este caso, el tiempo de relajación puede tener varios orígenes: cuando se busca la diferencia entre gas y líquido, "relajarse" significa "expandirse" y, por lo tanto, está relacionado con la tasa de expansión de la materia. La expansión es un tipo de flujo y en este caso, diremos que tenemos gas con un valor de $De \ll 1$. Cuando observemos la diferencia entre líquido y sólido, "relajación" significará "adaptación" y estará relacionado con el grado característico de adaptación de la forma del material a su recipiente. En este caso, diremos que tenemos un líquido si $De \ll 1$. Los sólidos "mantienen" su forma y volumen, es decir, no fluyen. Pero los sólidos pueden deformarse bajo tensión. Por último, cabe señalar que prácticamente todo el flujo está intrínsecamente formado por deformaciones.

En general, el número de Deborah es la expresión sin dimensión del concepto de viscoelasticidad. Cuanto mayor es el número de Deborah, más elástico/sólido es el material; cuanto menor es el número de Deborah, más viscoso/líquido. Así la reología sólo sugiere dos estados de la materia: sólidos que se deforman y líquidos que fluyen. Tanto los gases como los líquidos fluyen, el primero compresible y el otro incompresible. En general, las propiedades asociadas a los líquidos como a los sólidos pueden ser complejas, en el sentido de que la parte sólida puede no ser puramente elástica y la parte líquida puede no ser puramente viscosa.

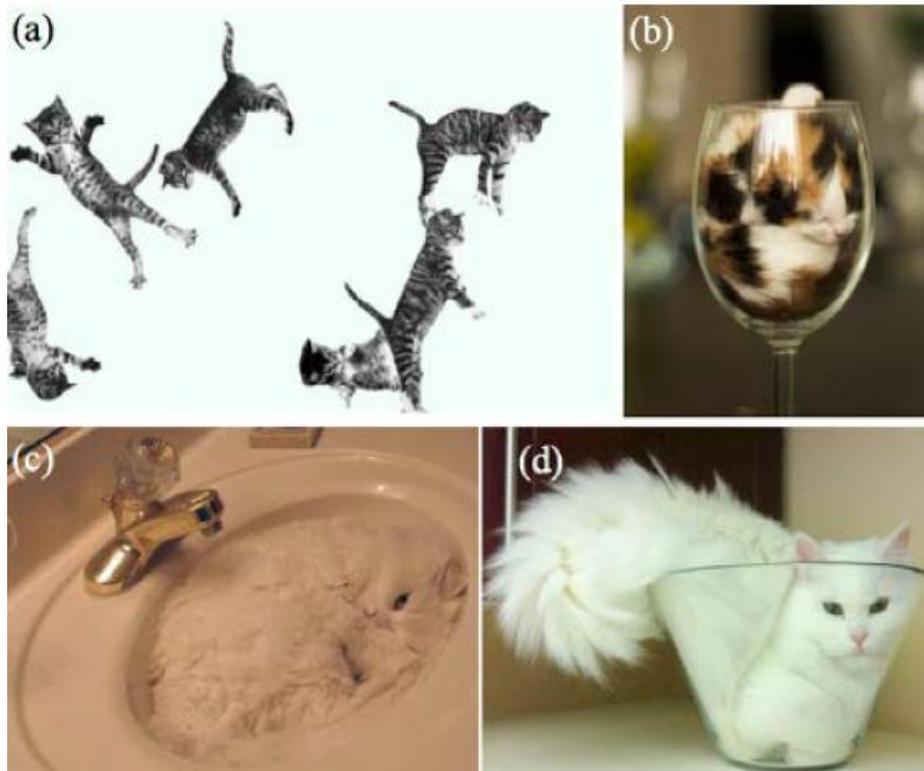


Figura 24. (a) Un gato aparece como sólido con una forma consistente, girando y rebotando, en escalas de tiempo cortas. Tenemos $De \gg 1$ porque el tiempo de observación es inferior a un segundo. (b) A escalas de tiempo mayores, un gato fluye y llena una copa de vino vacía. En este caso tenemos $De \ll 1$. En ambos casos, incluso si las muestras son diferentes, podemos estimar que el tiempo de relajación está en el intervalo $T = 1 \text{ s a } 1 \text{ min}$ (figuras c-d).

Fuente: [30]

En conclusión, los gatos están demostrando ser un modelo para la investigación reológica, tanto en regímenes lineales como no lineales. Experimentos muy recientes realizados en Japón sugieren que los gatos no deben considerarse sistemas fluidos aislados, sino capaces de transferir y absorber el estrés de su entorno. De hecho, en Japón hay cafeterías de gatos, donde los clientes angustiados pueden acariciarlos y desahogarse.

Comerciales

Hay una gran variedad de ejemplos reológicos que hacen aparición en comerciales y series de televisión, ya que las características de los materiales son interesantes, vistosos y recreativos, a continuación menciono algunos casos.

En la Figura 25 se muestra la diferencia entre la salsa cátsup de la marca Heinz y salsa tipo cátsup, haciendo referencia en el esfuerzo de cedencia de la marca Heinz el cual es un distintivo de calidad y así invitar a los consumidores a elegir esta opción.



Figura 25. Esfuerzo de cedencia en comercial de cátsup y salsa tipo cátsup

Fuente: [31]

La Figura 26 muestra un experimento sencillo, de fécula de maíz y agua para representar un fluido no newtoniano donde debido a la percusión de la bocina se comporta como sólido cuando la mezcla es líquida, de un programa de televisión

basado en la vida de un grupo de científicos, pasan una tarde de amigos igual de ñoños que ellos.



Figura 26. *Un fluido no newtoniano en un programa de televisión*

Fuente: [32]

En el siguiente ejemplo mencionan la diferencia de los aceites de automóvil, haciendo referencia que a mayor viscosidad menor es la eficiencia en el aceite para recubrir el motor en el arranque, ya que tardará más, sin embargo en el otro tipo de aceite evitará el desgaste del motor, siendo más eficiente y recubriendo mejor el motor (Ver Figura 27).

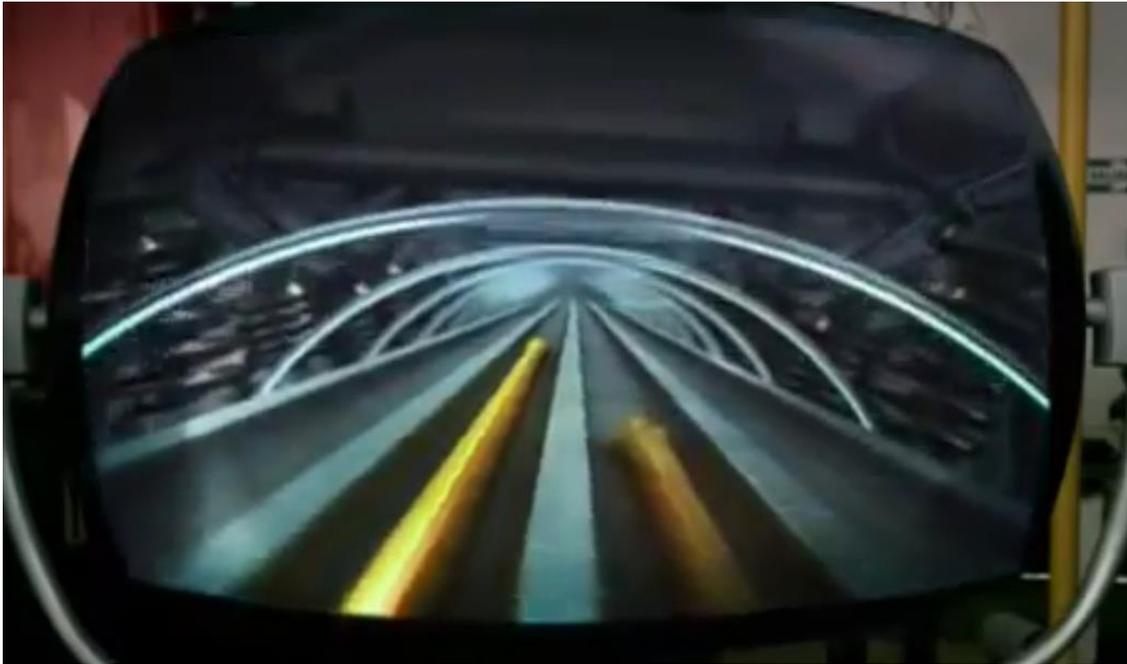


Figura 27. Diferencia de viscosidad en aceites de automóviles en comercial

Fuente: [33]

Para cuestionarse

1. ¿Por qué conviene que la Cátup, la pasta de dientes, y la espuma de afeitar presenten el fenómeno de esfuerzo de cedencia?

En estos productos es conveniente que se queden en su lugar de aplicación, esto para evitar escurrimientos y salpicaduras de los productos; ya que de no tener presente el esfuerzo de cedencia sería difícil la manipulación de dichos artículos.

2. ¿El petróleo es newtoniano o no newtoniano?

El petróleo es considerado fluido newtoniano ya que tiene una viscosidad constante sin importar cuán rápido se vean forzados a fluir, incluso a través de una tubería. Por lo tanto, el único factor que afecta su viscosidad es la temperatura.



3. ¿Cuáles de los siguientes productos presentan esfuerzo de cedencia?

Mermelada de fresa / Sí presenta

Mayonesa / Sí presenta

Cajeta / No presenta

Salsa Valentina / No presenta

Aderezo tipo Ranch / Sí presenta

4. ¿Qué papel tiene la reología en la selección del envase en productos tópicos cosméticos o medicinales?

Las características reológicas de los cosméticos y los productos farmacéuticos son importantes para el envasado, puesto que se desarrollan para aplicación externa, en forma de lociones, geles o cremas, a los usuarios les agrada la sensación de cremas para la piel cuando la aplican y desean que el medicamento esté en estado óptimo para que haga el efecto que debería, o bien para la aplicación oral, por ejemplo, como píldoras o jarabes, se los encuentra como líquidos, semisólidos y sólidos.

5. ¿Cuál debería ser el comportamiento de viscosidad de la crema comestible?

Debería mantener constante su viscosidad a temperatura ambiente y de ser posible lo más constante a temperaturas elevadas, aunque es difícil ya que no cumpliría con la ley de viscosidad de newton.

6. ¿La sangre es newtoniana o no newtoniana?



La sangre es un fluido no newtoniano ya que su viscosidad cambiará debido a la agitación o la presión (conocida técnicamente como esfuerzo cortante).

7. ¿Qué es un colchón viscoelástico?

Son colchones que están manufacturados de distintos materiales y tipos de espuma, son materiales que aportan propiedades de viscosidad y elasticidad para aliviar la presión en puntos del cuerpo.

8. ¿Qué tipo de fluido es el slime?

El slime es un fluido no newtoniano. Un fluido no newtoniano es aquél cuya viscosidad (resistencia a fluir) cambia de acuerdo al esfuerzo que se le aplique, es decir que se deforma en la dirección de la fuerza aplicada.



Conclusiones

Al término de esta investigación me permito expresar la siguiente conclusión.

Tras la revisión histórica y bibliográfica encuentro el desarrollo de la reología como una disciplina con diversas aplicaciones en diferentes rubros, ya sea en el desarrollo novedoso de gotas oftálmicas, en el manejo de aplicación de cosméticos, en consistencia para alimentos más saludables, en el transporte y distribución de hidrocarburos y hasta las curiosidades diarias como la reología de gatos.

La reología es una disciplina que tiene un gran alcance e importancia en nuestro día a día, puesto que el desarrollo de esta trae consigo una vida más fácil y divertida para todas y todos.

Tanto para el desarrollo de la ciencia, como para la divulgación es necesario de un equipo multidisciplinario, ya que cada uno tiene diferentes y valiosos puntos de vista.

Esto nos abre el campo para nuevas investigaciones.



Bibliografía.

- [1] “Ventanas que fluyen. ¿Mito o realidad?”
<https://www.silviaalonsoperez.com/2014/01/ventanas-que-fluyen-mito-o-realidad/> (accessed Apr. 06, 2022).
- [2] J. C. García Quesada, “Tema 3. Viscoelasticidad lineal,” 2008, Accessed: Apr. 07, 2022. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/3624>.
- [3] “Essential Tools for the New Rheologist - YouTube.”
<https://www.youtube.com/watch?v=WPf-jtzlboA> (accessed Apr. 06, 2022).
- [4] D. Doraiswamy, “The origins of rheology: a short historical excursion,” *Rheol. Bull.*, vol. 71, no. 1, pp. 1–9, 2002.
- [5] J. M. McDonough, “LECTURES IN ELEMENTARY FLUID DYNAMICS : Physics , Mathematics and Applications,” *Analysis*, 2009.
- [6] “¿Qué es la fricción? (artículo) | Khan Academy.”
<https://es.khanacademy.org/science/physics/forces-newtons-laws/inclined-planes-friction/a/what-is-friction#> (accessed Jan. 23, 2023).
- [7] M. del C. (Instituto P. N. Nuñez, *Introducción a la reología*. 2001.
- [8] “Rheology Series.” p. ii, 1989, doi: 10.1016/b978-0-444-87469-6.50001-9.
- [9] J. C. Cárdenas, O. J. López, and K. T. Pinto, “Fracturamiento Hidráulico,” *Rev. Fuentes El Reventón Energético*, vol. 9, pp. 5–12, 2011.



- [10] T. A. Strivens, *An introduction to rheology*. 1999.
- [11] S. Trujillo, “¿Por qué es importante medir la viscosidad?,” p. 1, 2017, [Online]. Available: <https://www.gob.mx/cenam/articulos/por-que-es-importante-medir-la-viscosidad?idiom=es>.
- [12] T. Transactions and C. Techniczne, “RHEOLOGY OF THE WET SURFACTANT FOAMS AND BIOFOMAS – A REVIEW WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE PIAN CIEKŁYCH WYTWARZANYCH NA BAZIE SYNTETYCZNYCH SURFAKTANTÓW ORAZ BIOSURFAKTANTÓW – PRZEGLĄD,” 2013.
- [13] A. B. Martínez, “Reología y química de las lágrimas artificiales / Alejandro Blasco Martínez,” 2022.
- [14] “Investigación reológica de los petroquímicos :: Anton Paar Wiki.” <https://wiki.anton-paar.com/mx-es/principios-basicos-de-reologia/investigacion-reologica-de-los-petroquimicos/#c49290> (accessed May 02, 2023).
- [15] “7. Dinámica de Fluidos.”
- [16] C. J. S. Petrie, “Extensional viscosity: A critical discussion,” *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 137, no. 1–3, pp. 15–23, 2006, doi: 10.1016/j.jnnfm.2006.01.011.
- [17] E. T. Peimbert, “Facultad de Ingenier ´ Extracci ´ on selectiva como un nuevo m ´ etodo para medir viscosidad extensional Ingeniero Mec ´ Esli Trejo Peimbert,” 2013.



- [18] M. Ortega Cerón, “Superiores Zaragoza “ Estudio Del Comportamiento Reológico De Un Ingeniero Químico Presenta : Mariana Ortega Cerón,” 2014.
- [19] J. C. Garcia, “Tema 3. viscoelasticidad. 3.1.,” pp. 1–33, 2008, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10045/3624>.
- [20] E. Rukke, R. K. Abrahamsen, and R. B. Schüller, “Rheology , texture and meltability of different types of cheese .,” vol. 26, 2018.
- [21] “Hellman’s vs Heinz : Mayonnaise Fat Reduction Rheology.” <https://www.rheologylab.com/articles/food/fat-replacement/> (accessed Aug. 03, 2023).
- [22] I. Extractivas, “Instituto politécnico nacional,” 2016.
- [23] M. A. C. PERALTA, “Comportamiento viscoplástico en la aleación tribológica de aluminio SAE783,” p. 61, 2015.
- [24] T. (Terri) Chen, “Rheological Techniques for Yield Stress Analysis,” *TA Instruments Tech. notes - RH025*, pp. 1–6, 2000.
- [25] M. J. Hernández Lucas, “Caracterización reológica de hidrogeles de MCC-NaCMC + almidón. Tixotropía y sinergismo,” p. 232, 1996.
- [26] T. Oliag, “Caracterización del alimento fluido tixotrópico,” *Univ. Politec. Val.*, 2010.
- [27] N. R. Rojas-Reyes and M. O. Bustamante-Rúa, “Influencia de los esfuerzos



normales a la dirección de flujo cizallante en la reología de suspensiones concentradas de caolín,” *DYNA*, vol. 81, no. 184, pp. 85–92, 2014, doi: 10.15446/dyna.v81n184.39069.

- [28] “Líquidos exóticos - Leopoldo García-Colín Scherer, Rosario Rodríguez Zepeda - Google Libros.”
https://books.google.com.mx/books?id=elgWDQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22Leopoldo+García-Colín+Scherer%22&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
(accessed Apr. 06, 2022).
- [29] “Open siphon effect - GIF - Imgur.” <https://imgur.com/uvfMyb3> (accessed Jul. 25, 2023).
- [30] M. A. Fardin, “On the rheology of cats,” vol. 83, no. July, pp. 16–18, 2014.
- [31] “(52) Ketchup Heinz Recreo - YouTube.”
<https://www.youtube.com/watch?v=n9aaZon1-M8> (accessed May 02, 2023).
- [32] “(52) The Big Bang Theroy - Non Newtonian Fluid - YouTube.”
<https://www.youtube.com/watch?v=aPZtuhVmgHk> (accessed May 02, 2023).
- [33] “(52) Castrol viscosidad - YouTube.”
<https://www.youtube.com/watch?v=R4As6LOYZEU> (accessed May 02, 2023).